

№24
2025

Механика



Вестник

Научное
периодическое
издание

*Научное периодическое издание по
материалам XXIV Всероссийской научно-
технической конференции*

Механики XXI веку

№ 24 2025г.

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Рыков С.П. – председатель конференции, д.т.н., профессор кафедры «Машиностроение и транспорт» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск;

Огар П.М. – д.т.н., профессор кафедры «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск;

Зеньков С.А. – к.т.н., зав. кафедрой «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск

Архинов П.В. – к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и транспорт» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск;

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Рыков С.П. – д.т.н., профессор кафедры «Машиностроение и транспорт» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Федоров В.С. – к.т.н., доцент кафедры «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск

Издается с 2004 года. Периодичность 1 номер в год

Журнал зарегистрирован в научной электронной библиотеке Elibrary.ru

Перепечатка материалов из журнала «Механики XXI веку» возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.

Адрес редакции: 665709, Российская Федерация, Иркутская область, г. Братск, ул. Макаренко, 40,

Факультет транспортных систем и лесного комплекса,
кафедра «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные
машины и оборудования», тел: 8(3953)344-000 доб.365

E-mail: mechanics@brstu.ru Сайт: <http://www.brstu.ru>

Братск 2025

XXIV Всероссийская научно-техническая конференция "МЕХАНИКИ XXI ВЕКУ"

17 Апреля 2025 г.

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ:

Эксплуатация и ремонт машин и оборудования;
Конструкции, технические и эксплуатационные свойства транспортных средств;
Современные технологии и автоматизация в машиностроении;
Материаловедение, динамика и прочность машин и механизмов.

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Братский государственный университет», г. Братск, Россия

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Рыков С.П. – председатель конференции, д.т.н., профессор кафедры «Машиностроение и транспорт» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск, тел: 8(3953) 32-53-61; **Архинов П.В.** - к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и транспорт» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск; **Огар П.М.** - д.т.н., профессор кафедры «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск; **Зеньков С.А.**- к.т.н., зав. кафедрой «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск **Федоров В.С.** - к.т.н., доцент кафедры «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» ФГБОУ БрГУ, г. Братск.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Федоров В.С. - к.т.н., доцент кафедры «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» БрГУ; **Архинов П.В.** - к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и транспорт» ФГБОУ БрГУ.

© Авторы публикаций, 2025

© ФГБОУ ВО «БрГУ», 2025

***ЭКСПЛУАТАЦИЯ,
РЕМОНТ МАШИН И
ОБОРУДОВАНИЯ***

УДК 621.271

Оборудование для глубокоселективной выемки ценного минерального сырья с сохранением его природного качества

Чебан А.Ю.^{1,а}

¹Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, ул. Тургенева 51, Хабаровск, Россия

^аchebanay@mail.ru

Ключевые слова: кварцевые жилы, экскаватор, специальное оборудование, выбуривание керна большого диаметра, гидромолот.

В статье предлагается технико-технологическое решение по опережающей выемке включений наиболее качественного кварца при открытой разработке месторождения посредством выбуривания и извлечения в виде кернов большого диаметра. Выбуривание осуществляется с использованием специального оборудования гидравлического одноковшового экскаватора, включающего колонковую буровую колонну, поворотный круг и телескопический удлинитель. Полученный керн большого диаметра подрезается в забое и поднимается на дневную поверхность поэлементно. После выемки наиболее ценных включений кварцевой жилы производится бурение сети скважин, их зарядание и взрывное рыхление вскрышных пород, а оставшаяся часть жилы разрушается гидромолотом, устанавливаемым на экскаватор в качестве сменного оборудования. Применение механической выемки позволит сократить выход некондиционных фракций кварцевого сырья и увеличит рентабельность горного производства.

Введение. Наиболее остро вопрос сохранения природного качества добываемых минеральных ресурсов стоит при освоении месторождений кристаллосырья (драгоценных и полудрагоценных камней, оптического кварца) [1-4]. Применение взрывного рыхления горного массива при разработке таких объектов приводит к образованию различных дефектов (трещин, сколов, разрушения кристаллов и др.), что существенно снижает ценность получаемого кристаллосырья, а при добыче оптического кварца, кроме того, предопределяет повышенный выход некондиционных мелких фракций [1, 4]. Таким образом, важной задачей горной науки применительно к развитию технико-технологических решений по добыче кристаллосырья является совершенствование технологий и оборудования, обеспечивающих максимальное сохранение форм, размеров и структуры содержащихся в нем кристаллов, а, следовательно, повышение ценности получаемой товарной продукции и увеличение рентабельности производства.

Состояние вопроса

Для повышения сохранности кристаллосырья при ведении добычных работ все шире используются безвзрывные технологии с применением механического рыхления, а также комбинированные способы с предварительным разупрочнением массива [3]. Для механического рыхления горных пород применяются фрезерные комбайны различных конструкций, бульдозерно-рыхлительные агрегаты, гидравлические молоты на базе одноковшовых экскаваторов и другое оборудование [5-12]. Так переход от взрывного рыхления к механическому с применением комбайновой выемки кимберлитовой руды при ведении как открытых, так и подземных работ на объектах АК «АЛРОСА» обеспечил повышение стоимости получаемой продукции на 10-14% за счет увеличения выхода крупных кристаллов алмазов [13]. Известна технологическая схема выемки кимберлитов путем выбуривания кернов большого диаметра с их последующей подрезкой, подъемом на

поверхность и закладкой выработанного пространства, при этом полученные керны размываются высоконапорными струями гидромониторов, после чего пульпа направляется на обоганительное оборудование с целью извлечения алмазов [14], однако необходимо отметить, что применение данной технологии для выемки всего объема кимберлитовых руд ведет к неоправданному повышению себестоимости добычных работ. Для обеспечения сохранности природного качества кристаллов рубинов при разработке месторождений корундов в исследовании [15] предлагается комбинированная технология, включающая гидроразрыв горных пород и «щадящее» взрывание с эффектом декаплинга для отбойки сформированных гидроразрывом блоков с сохранением их целостности. Известны кристаллосберегающие технологии освоения месторождений цветного турмалина и горного хрусталя [16-17].

При добыче оптического кварца необходимо учитывать его особые физико-механические свойства и структуру [18]. Так на некоторых месторождениях ценного кварцевого сырья в результате слабой спайности зерен, которые имеют размер 1-2мм, кварц подвержен массовому разрушению на отдельности от сейсмического воздействия взрыва, при этом кондиционным для последующей переработки являются куски кварца размером менее 20мм [1]. В связи с этим при освоении подобных месторождений необходимо исключить взрывное рыхление полезного ископаемого и обеспечить его структурную сохранность. В работе [1] для отбойки кварцевых жил предлагается использовать гидромолот, установленный в качестве сменного оборудования на одноковшовый экскаватор, при осуществлении вскрыши ведется взрывное рыхление массива вмещающих пород. Существенным недостатком технологии является сейсмическое воздействие взрыва на кварцевый массив, что приводит к развитию в нем трещин (это подтверждается снижением прочности массива и ростом производительности отбойки гидромолотом с 20 до 30м³/ч), а, следовательно, снижению качества высокоценного сырья и увеличению выхода некондиционных мелких фракций.

Целью работы является совершенствование известных технико-технологических решений по открытой разработке месторождений кристаллосырья для повышения сохранности его качества за счет ведения опережающей механической выемки зон наиболее качественного кварца.

Результаты исследований и их обсуждение.

Автором предлагается технико-технологическое решение, направленное на повышение сохранности природного качества высокоценного кварцевого сырья, предполагающее опережающую механическую выемку зон наиболее качественного кварца путем их выбуривания и извлечения в виде кернов большого диаметра посредством специального оборудования 1, устанавливаемого на одноковшовый гидравлический экскаватор 2 (рис.1).

Специальное оборудование 1 включает колонковую буровую колонну 3, поворотный круг 4 и телескопический удлинитель 5, взаимодействующий с рукоятью 6 и гидроцилиндром 7 экскаватора 2. Экскаватор 2 со специальным оборудованием 1 позиционируется над зоной 8 жилы 9, содержащей наиболее качественный кварц, выявленной в процессе сопровождающей эксплуатационной разведки. Специальное оборудование 1 позиционируется с учетом угла падения кварцевой жилы 9 и центрируется по наклонной разведочной скважине 10. Производится выбуривание керна большого диаметра 11 с его последующим подрезанием и извлечением на дневную поверхность. В дальнейшем цикл повторяется с извлечением отдельных элементов 12 и бурением на одном месте на величину выдвижения телескопического удлинителя 5. Затем экскаватор 2 занимает новую позицию и осуществляет бурение с извлечением кернов 11 полезного ископаемого из смежных скважин большого диаметра 13.

После «щадящего» извлечения из недр основной части наиболее качественного сырья, производится обурирование горного массива, зарядание взрывных скважин, взрывное рыхление вскрышных пород 14 и их погрузка карьерным экскаватором в автосамосвалы для перемещения в отвал (на рисунке не показано).

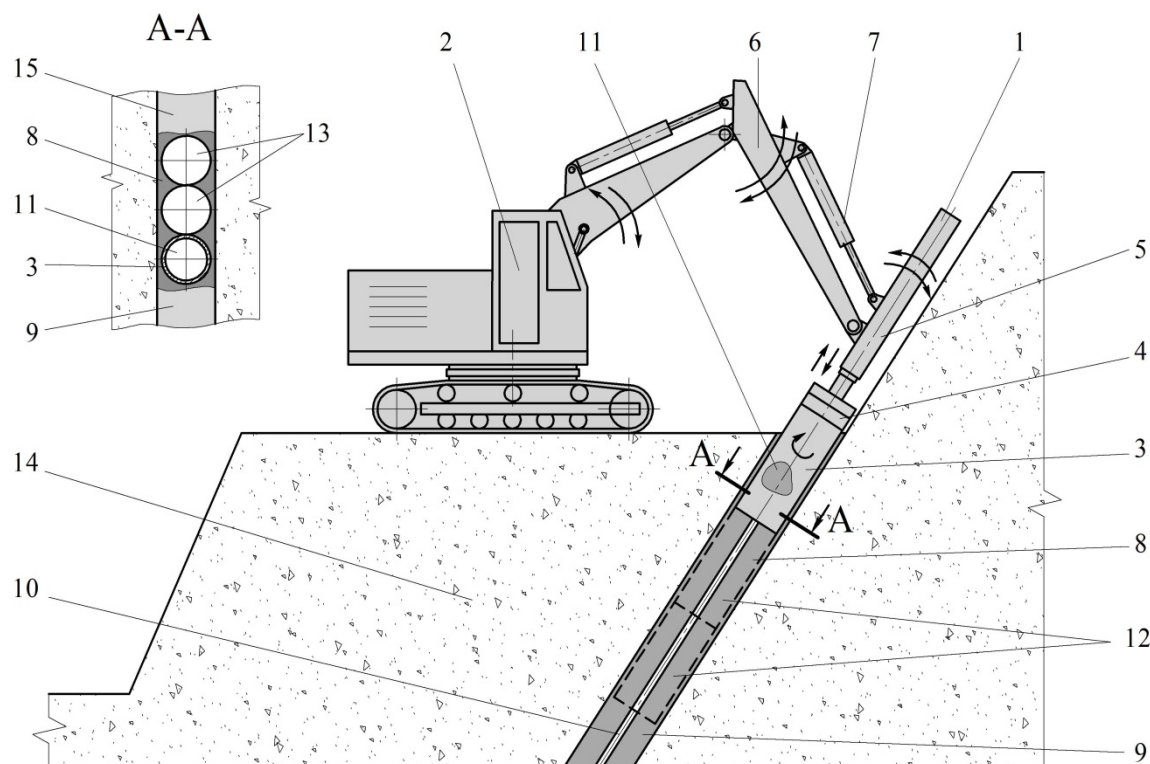


Рис.1 Схема экскаватора со специальным оборудованием для опережающей механической выемки зон наиболее качественного кварца

Отбойка обнаженной кварцевой жилы 9 ведется гидромолотом, установленным на экскаватор взамен специального оборудования, при этом первоначально осуществляется доработка оставшихся запасов зон 8 с наиболее качественным кварцем, затем ведется отбойка кварцевого сырья рядового качества 15 (на рисунке не показано). Добытое кварцевое сырье грузится в транспортные средства и направляется на переработку.

Выводы.

Предлагаемое технико-технологическое решение по открытой разработке кварцевых жил обеспечивает повышение сохранности кристаллосырья за счет опережающей механической выемки зон наиболее качественного кварца в виде кернов большого диаметра, извлекаемых поэлементно посредством специального оборудования, устанавливаемого на гидравлический одноковшовый экскаватор.

Литература:

1. Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Яковлев А.М., Козлова М.В. Технологические особенности открытой разработки высокочистого кварца // Известия вузов. Горный журнал. 2020. №6. С. 14-25.
2. Smit K. V., Shor R. Geology and development of the Lomonosov diamond deposit, northwestern Russia // Gems & Gemology, 2017, vol. 53, no. 2, pp. 144-167.
3. Секисов А.Г., Чебан А.Ю. Технология разработки кимберлитов с применением скрепера, оснащенного комбинированным оборудованием // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2023. Вып.1. С. 328-337.

4. Leach P., Heyden B., Ravenscroft P. A novel economic-filter for evaluating sub-Saharan diamondiferous kimberlites // Journal Of The Southern African Institute Of Mining And Metallurgy, 2020. vol. 120, no. 9, pp. 541-545.
5. Чебан А.Ю. Классификация технологических схем применения карьерных комбайнов // Системы. Методы. Технологии. 2015. №2. С. 159-163.
6. Анистратов Ю.И., Борщ-Компониец Л.В., Анистратов К.Ю. Эффективность открытой разработки месторождений по природно-технологическим зонам // Горный журнал. 1990. №8. С. 19-24.
7. Чебан А.Ю. Классификация конструкций карьерных комбайнов // Недропользование XXI век. 2015. №5 (55). С. 64-69.
8. Шемякин С.А., Чебан А.Ю., Клигунов Е.С. Повышение эффективности послойно-полосовой технологии открытых горных работ с применением выемочных машин фрезерного типа и скреперов // Горный журнал. 2003. №4-5. С. 48-50.
9. Kumar C., Kumaraswamidhas L. A., Murthy V. M. S. R., Prakash A. Experimental investigations on thermal behavior during pick-rock interaction and optimization of operating parameters of surface miner // International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences, 2020, vol. 133, 104360.
10. Пихлер М., Дикк Ф., Панкевич Ю.Б. Комбайны Wirtgen Surface Miner на добыче алмазов на Аляске // Горная промышленность. 2009. №4. С. 14-15.
11. Чебан А.Ю. Способ подготовки прочных горных пород к выемке при ведении строительных и добычных работ // Механизация строительства. 2017. №9. С. 20-23.
12. Чебан А.Ю. Технология доработки рудных тел добычной установкой, оборудованной автономным выемочным модулем // Маркшейдерия и недропользование. 2019. №4. С. 22-28.
13. Чаадаев А.С., Зырянов И.В., Иван Ф.Б. Состояние и перспективы развития горнообогатительных технологий на алмазодобывающих предприятиях АК «АЛРОСА» (ПАО) // Горная промышленность. 2017. №2. С. 6-13.
14. Ермаков С.А., Федоров Л.Н. Новые способы разработки малообъемных алмазных месторождений и доработки подкарьерных запасов алмаза // Наука и образование. 2015. №4 (80). С. 62-67.
15. Барнов Н.Г., Еременко В.А., Кондратенко А.С. Отбойка сформированных гидровзрывом блоков при ведении очистных работ зарядами ВВ с эффектом декаплинга // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. №3. С. 200-209.
16. Воронов Е.Т. Кристаллосберегающая технология добычи цветного турмалина // Горный журнал. 2010. №5. С. 42-44.
17. Воронов Е.Т., Бондарь И.А. Кристаллосберегающие технологии подземной разработки горного хрусталя // Горный журнал. 2011. № 11. С. 23-25.
18. Соколов И.В., Смирнов А.А., Рожков А.А. Обоснование оптимальных параметров буровзрывных работ при отбойке кварца // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. №7. С. 337-350.

Equipment for deep selective extraction of valuable mineral raw materials while preserving their natural quality

Cheban A.Yu.^{1,a}

¹Mining Institute the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, 51 Turgenev st., Khabarovsk, 680000, Russian Federation

^achebanay@mail.ru

Keywords: quartz veins, excavator, special equipment, large diameter core drilling, hydraulic hammer.

The article proposes a technical and technological solution for the advanced extraction of inclusions of the highest quality quartz during open-pit mining of a deposit by drilling and extracting them in the form of large-diameter cores. Drilling is carried out using special equipment

of a hydraulic single-bucket excavator, including a core drill column, a rotary circle and a telescopic extension. The resulting large diameter core is cut at the face and raised to the surface element by element. After the most valuable inclusions of the quartz vein have been extracted, a network of wells is drilled, charged and the overburden is loosened by blasting, and the remaining part of the vein is destroyed by a hydraulic hammer installed on the excavator as replaceable equipment. The use of mechanical extraction will reduce the output of substandard fractions of quartz raw materials and increase the profitability of mining production.

УДК 621.271

Модернизированный карьерный комбайн с комбинированным оборудованием для разработки сложноструктурных месторождений

Чебан А.Ю.^{1,а}

¹Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, ул. Тургенева 51, Хабаровск, Россия

^аchebanay@mail.ru

Ключевые слова: сложноструктурный угольный пласт, механическая выемка, прочные породные прослои, предварительное разупрочнение, производительность.

В статье предлагается конструкция модернизированного карьерного комбайна с комбинированным оборудованием для разработки сложноструктурных угольных пластов с прослоями прочных пород. Комбинированное рабочее оборудование включает фрезерный рабочий орган, приемный и разгрузочный конвейеры, систему разупрочнения с нарезными дисками и форсунками. Рыхление угля осуществляется фрезерным рабочим органом без предварительного разупрочнения, отбитый уголь посредством приемного и разгрузочного конвейеров загружается в транспортное средство. При обнажении прочного породного прослоя нарезные диски опускаются и осуществляют формирование в нем щелей с последующей подачей через форсунки раствора поверхностно-активных веществ, обеспечивающих разупрочнение породного прослоя. Применение данного технико-технологического решения позволяет увеличить производительность комбайна при разработке сложноструктурного пласта и снизить себестоимость добычи угля.

Введение. Важными вопросами горного производства, которые необходимо решать в процессе освоения сложноструктурных месторождений полезных ископаемых, являются повышение качества извлекаемого из недр минерального сырья, уменьшение потерь при добыче, полнота использования добытых ресурсов [1-3]. Основной объем угля и горючих сланцев добывается открытым способом, наращивание объемов добычи угля и снижение себестоимости твердого топлива невозможно без технического и технологического перевооружения горных предприятий [4-5]. Многие месторождения угля и горючих сланцев характеризуются сложной структурой, когда пласты полезного ископаемого переслаиваются пустыми породами, при этом мощность пластов и пропластков может варьироваться от нескольких метров до нескольких сантиметров. Разработка таких месторождений с применением традиционных технологий, при которых рыхление массива осуществляется взрывным способом, а выемка горной массы ведется одноковшовыми экскаваторами ведет к существенным потерям полезного ископаемого и его разубоживанию [6-8]. На угольных

разрезах Дальнего Востока, минимальная мощность селективно извлекаемого угольного пласта, с учетом технических параметров выемочного оборудования, составляет 1-2м, при этом максимальная мощность внутрипластовых породных прослоев, включаемая в подсчет запасов, достигает 0,7-1м, вследствие чего, маломощные пласты угля вместе с пустыми породами отправляются в отвал, а прослои пустых пород извлекаются совместно с углем, значительно снижая его качество [9-10].

Состояние вопроса и постановка проблемы

Существенно повысить качество получаемой продукции при разработке сложноструктурных месторождений позволяет переход на технологии, предполагающие механическое рыхление горного массива с использованием карьерных комбайнов [11-12]. Карьерные комбайны обеспечивают высокопроизводительную выемку угля и горючих сланцев, а также качественную селективную выемку породных прослоев [13-14]. Недостатком комбайновой выемки является резкое снижение производительности карьерных комбайнов при работе с прочными породными прослоями [15]. Необходимо отметить, что для многих сложноструктурных месторождений характерно большое различие в прочности полезного ископаемого и вмещающих пород. Так на Восточно-Бейском разрезе каменный уголь имеет прочностью около 1,5-2 единиц по шкале М.М. Протодяконова, при этом прочность прослоев пустых пород (аргиллиты, алевролиты, песчаники и др.) изменяется от 3-4 до 6-8 единиц, на карьере Кивиоли (Эстония) пласты горючих сланцев прочностью 2-4 единицы по шкале М.М. Протодяконова перемежаются с пропластками известняка прочностью от 5 до 10 единиц [13]. На разрезе Талдинский породные прослои, представленные песчаниками, алевролитами и сидеритами прочностью до 8-12 единиц по шкале М.М. Протодяконова многократно превышают прочность каменного угля [14]. Очевидно, что с уменьшением производительности будет возрастать себестоимость работ, в исследовании [11] установлено, что себестоимость разработки угля на Эльгинском месторождении карьерными комбайнами на 30% ниже в сравнении с применением взрывного рыхления и выемкой угля одноковшовыми экскаваторами, однако себестоимость разработки прочных пород с использованием карьерных комбайнов в 2,2 раза выше по сравнению с традиционной технологией.

Повысить производительность механического рыхления прочных пород возможно за счет их предварительного ослабления различными способами [14, 16, 17], в частности с применением растворов поверхностно-активных веществ (ПАВ). Так на Талдинском разрезе для повышения эффективности работы карьерного комбайна КСМ-2000Р в экспериментальном блоке была пробурена сеть заливочных скважин 1,3х1,3м, глубиной 1м, через которые в массив подавался раствор ПАВ, после пропитки раствором в течение двух суток прочность на сжатие мелкозернистых песчаников снизилась с 93 до 60МПа [14]. Разупрочнение образцов скальных вскрышных пород Эльгинского угольного месторождения растворами ПАВ позволило снизить прочность пород на 30-50% [16]. Недостатком технологической схемы, предполагающей бурение сети заливочных скважин, является необходимость последовательного применения различного оборудования, что ставит под вопрос экономическую целесообразность ее использования для разупрочнения породных прослоев малой мощности.

Целью исследования является разработка технико-технологического решения, обеспечивающего возможность эффективного массового послойного механического рыхления сложноструктурных угольных пластов, содержащих прослои пустых пород, имеющих прочность существенно большую прочности полезного ископаемого.

Результаты исследований и их обсуждение.

В Институте горного дела ДВО РАН обоснована безвзрывная технология селективной разработки сложноструктурных пластов, сложенных породами, существенно различающимися по прочности. Отработка сложноструктурного угольного пласта ведется

модернизированным карьерным комбайном с комбинированным рабочим оборудованием, включающим фрезерный рабочий орган 1, приемный 2 и разгрузочный 3 конвейеры, систему разупрочнения 4 породных прослоев 5 (рис. 1).

При разработке сложноструктурного угольного пласта отбитый уголь подается на приемный конвейер 2 и далее через разгрузочный конвейер 3 – в автосамосвал (на рисунке не показан). Обнажившийся в процессе фрезерования верхнего пропластка угля 6 прочный породный прослой 5 дезинтегрируется системой разупрочнения 4, включающей поворотную раму 7 с набором нарезных дисков 8, форсунки 9 и емкость 10 с раствором ПАВ. При этом поворотная рама 7 опускается и нарезные диски 8 формируют в прочном прослое 5 щели 11, в которые из емкости 10 через форсунки 9 подается раствор ПАВ, постепенно пропитывающий горную породу, обеспечивая равномерное разупрочнение прочного породного прослоя 5. Пропитка прослоя 5 раствором ПАВ обеспечивает снижение прочности горных пород на 30...50%. За время необходимое для пропитки и разупрочнения прослоя 5, модернизированным карьерным комбайном отрабатываются смежные полосы верхнего пропластка угля 6.

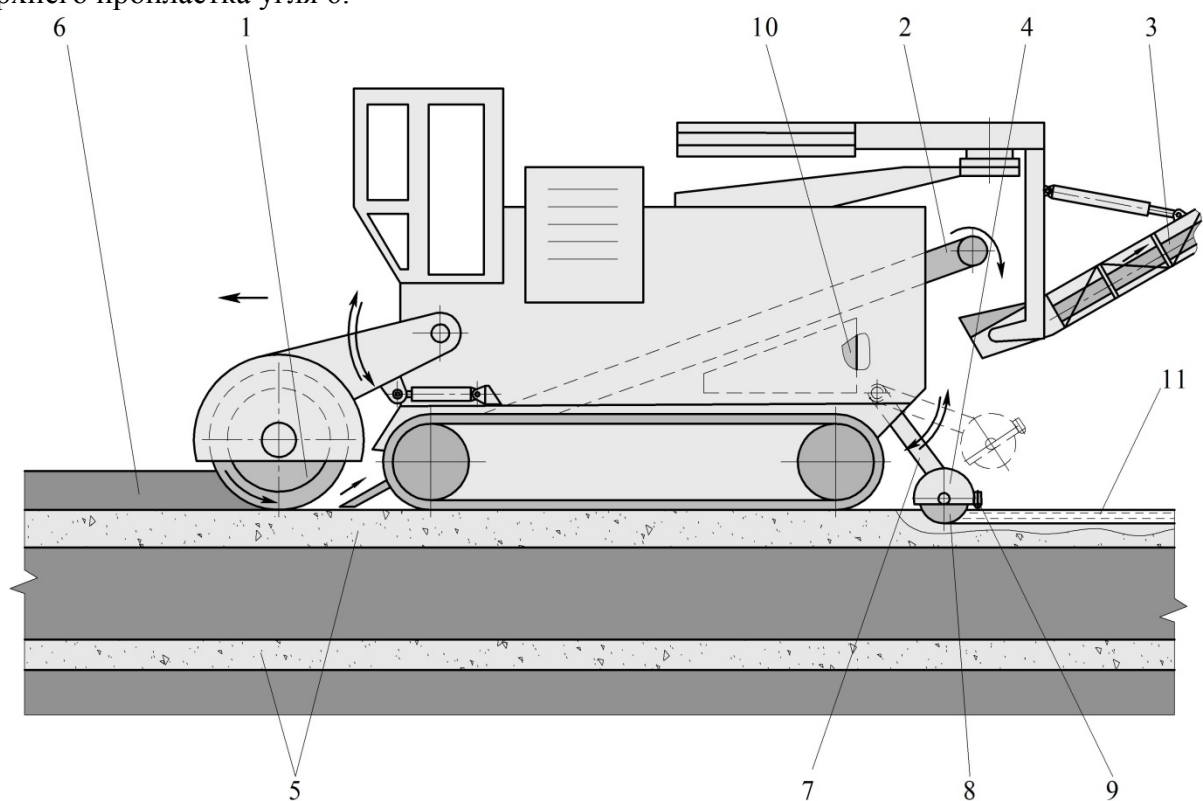


Рис. 1. Схема разработки сложноструктурного угольного пласта модернизированным карьерным комбайном

Затем комбайном производится механическое рыхление и выемка разупрочнённых пород прослоя 5 с погрузкой пустых прод в автосамосвал и их транспортировкой в отвал.

Выводы.

Предлагаемое технико-технологическое решение позволяет повысить эффективность разработки сложноструктурных угольных пластов, включающих прослой, имеющие прочность значительно выше, чем у полезного ископаемого. Формирование нескольких щелей в подготавливаемой к отработке полосе обеспечивает равномерную пропитку и дезинтеграцию прочного породного прослоя, что существенно увеличивает производительность механического рыхления и снижает себестоимость добычных работ.

Литература:

1. Трубецкой К.Н., Захаров В.Н., Галченко Ю.П. Природоподобные и конвергентные технологии при освоении минеральных ресурсов литосферы // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. №6. С. 560-566.
2. Юматов Б.П., Валатка З.И., Секисов А.Г., Зыков Н.В. Управление рудо-потоками на карьерах с использованием ЭВМ // Горный журнал. 1984. №12. С. 33-41.
3. Чебан А.Ю., Шемякин С.А. Параметры скреперов для внедрения послойно-полосовые технологии открытых горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. Т.10. №12. С. 285-294.
4. Mohd Imran. Variation of production with time, cutting tool and fuel consumption of surface miner 2200 SM 3.8 // International Journal of Technical Research and Applications, 2016, no. 1, pp. 224–226.
5. Чебан А.Ю. Селективная разработка Эльгинского угольного месторождения с применением выемочно-сортировочного комплекса // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2017. №4. С. 247-254.
6. Линник Ю.Н., Линник В.Ю. Оценка технического уровня добычи угля открытым способом // Горное оборудование и электромеханика. 2013. №6. С. 14-20.
7. Чебан А.Ю., Хрунина Н.П. Техника и технологии разработки угольных разрезов Приамурья и перспективы их развития // Маркшейдерия и недропользование. 2015. №1. С. 19-21.
8. Dey K., Pathak K., Sen P. Environmental acceptability of Wirtgen Surface Miner for Indian surface coal mines // National Seminar on Mining in the New Millennium, 10–12 November 2000. – Hyderabad, 2000, pp. 136–142.
9. Щадов В.М. Открытая разработка сложноструктурных угольных месторождений Восточной Сибири и Дальнего Востока. М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. 298 с.
10. Чебан А.Ю. Выемочная техника, задействованная на угольных разрезах в южной части Дальневосточного региона // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2013. №3 (30). С. 081-084.
11. Ермаков С.А., Иль А.П., Хосоев Д.В. Оценка эффективности применения комбайнов Wirtgen на Эльгинском каменноугольном месторождении // Горная промышленность. 2018. №6. С. 77-79.
12. Чебан А.Ю. Способ добычных работ для малых угольных разрезов с применением усовершенствованного карьерного комбайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. №2. С. 36-42.
13. Пихлер М., Панкевич Ю.Б., Николаев Д.В. Первые результаты работы горного комбайна Wirtgen 2500SM на сланцевом карьере Kivioli (Эстония) // Горная промышленность. 2006. № 3. С. 20-22.
14. Кузнецов А.Г., Штейнцайг Р.М., Воронков Г.Я., Шендеров А.И. Применение методов физико-химического разупрочнения массивов крепких горных пород при работе машин типа КСМ // Горная промышленность. 1997. №4. С. 3-7.
15. Чебан А.Ю. Совершенствование техники и технологий безвзрывной разработки горных пород : моногр. / А. Ю. Чебан. - Хабаровск: ИГД ДВО РАН, 2017. - 260 с.
16. Панишев С.В., Хосоев Д.В., Матвеев А.И. Повышение эффективности разработки вскрышных пород и углей Эльгинского месторождения Якутии путем их разупрочнения с использованием поверхностно-активных веществ // Горная промышленность. 2021. №1. С. 98-104.
17. Talele S., Dalvi A., Rane G., Nawar J. Water-jet cutting - a precise method for manufacturing process // International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology, 2020, vol. 4, pp. 471-473.

Modernized open-pit mining machine with combined equipment for the development of complex-structure deposits

Cheban A.Yu.^{1,a}

¹Mining Institute the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, 51 Turgenev st., Khabarovsk, 680000, Russian Federation

^achebanay@mail.ru

Keywords: complex structure coal seam, mechanical extraction, strong rock layers, preliminary softening, productivity.

The article proposes the design of a modernized open-pit mining machine with combined equipment for the development of complex-structured coal seams with layers of hard rocks. The combined working equipment includes a milling working element, receiving and unloading conveyors, a softening system with cutting disks and nozzles. Coal loosening is carried out by a milling working element without preliminary softening, the broken coal is loaded into a transport vehicle via receiving and unloading conveyors. When a strong rock layer is exposed, the cutting discs are lowered and form cracks in it, followed by the supply of a solution of surfactants through nozzles, which ensures the weakening of the rock layer. The use of this technical and technological solution allows increasing the productivity of the combine when developing a complex-structured seam and reducing the cost of coal mining.

УДК 621.165.76

Проблемы эксплуатации и неисправности вала ротора турбины: причины и методы устранения

Ващишина А. П.^{1,a}, Ващишин С. П.¹, Злыднев В. Д.¹

¹Брянский государственный технический университет, Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7, Россия

^avashhi.anya@yandex.ru

Ключевые слова: вал ротора турбины, неисправности, поломка.

В статье проведен анализ вала ротора газовой турбины с целью выявления неисправностей, возникающего в процессе их эксплуатации. Можно выделить три основных вида поломок: знакопеременный изгиб напряжений, динамические явления и вибрации. Выявлены основные признаки и причины неисправностей, его влияние на работу турбин.

Введение. Газовые турбины представляют собой один из наиболее эффективных и широко используемых типов двигателей, применяемых в различных отраслях, включая энергетику, авиацию и промышленность. Они работают на основе принципа преобразования тепловой энергии, получаемой от сгорания топлива, в механическую энергию, которая затем используется для приведения в движение генераторов, компрессоров и других механизмов. В связи с высокой сложностью и многофункциональностью газовых турбин, их эксплуатация требует особого внимания к техническому состоянию и надежности всех компонентов, особенно вала ротора, который является ключевым элементом в системе.

Неисправности вала ротора газовой турбины могут привести к серьезным последствиям, включая остановку работы оборудования, значительные финансовые потери и

даже угрозу безопасности. В условиях современного производства, где надежность и эффективность работы оборудования играют решающую роль, важно не только выявлять и устранять неисправности, но и проводить профилактические мероприятия, направленные на предотвращение их возникновения.

Признаки и причины неисправности вала ротора турбины. Неисправности вала ротора газовой турбины могут проявляться в различных формах, каждая из которых требует внимательного анализа.

Знакопеременные изгибные напряжения возникают в процессе нагрева установки. На начальном этапе работы газовой турбины (ГТУ) наружные стенки корпуса и фундамента могут не прогреваться одновременно с валом. Это приводит к возникновению внутренних напряжений, максимально влияющих на целостность вала. Такая нагрузка может стать причиной разрушения, если не будет учтена при проектировании и эксплуатации. Данный момент особенно важен при запуске машин в условиях низких температур, где термическое расширение компонентов не может происходить равномерно. Такие условия могут способствовать образованию поломок вала, что согласуется с результатами различных исследований [1].

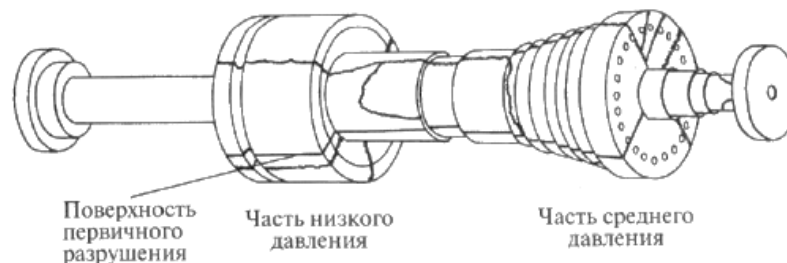


Рис. 1 Схема развития трещин при знакопеременных изгибных напряжениях

Динамические явления и вибрации – это еще один значимый фактор, влияющий на ресурс вала ротора. Во время работы ГТУ возникают колебания, вызванные не только производственными процессами, но и конструктивными особенностями. Повышенные уровни вибрации могут привести к разным формам повреждений. Особенно уязвимыми являются узлы, подверженные высокодуговым нагрузкам [1]. Неправильная установка и регулировка может ухудшить балансировку агрегата, что усугубляет ситуацию.

Причины поломки могут также заключаться в недостатках конструкции и точности изготовления. Выбор материалов и несоответствие геометрических параметров приводят к смещению центра масс и перекосу осей. Несоответствие в производстве может увеличить уровень дисбаланса и, как следствие, вызвать вибрации, которые отрицательно воздействуют на вал [2]. Литейные дефекты или неточные размеры деталей становятся источником системных ошибок, зачастую не проявляющихся на начальных стадиях эксплуатации.

В ходе плановых остановок возможны и другие неисправности, такие как износ подшипников и касания деталей ротора о корпус. Эти дефекты могут быть выявлены во время диагностики роторов, когда оборудование вскрывают для осмотра. Настоятельно рекомендуется использовать современное диагностическое оборудование для точной оценки состояния компонентов [3].

Скачки температур в системе также могут сигнализировать о проблемах в механизме. Необычные изменения в температурных пиках могут указывать на касание деталей ротора с корпусом, а также на наличие деформации вала. Температурные аномалии особенно критичны, так как они могут приводить к серьезным поломкам и даже к полной остановке системы. Методики температурного мониторинга могут сыграть решающую роль в своевременной диагностике и предотвращении аварий.

Более того, положение и напряженно-деформированное состояние вала являются важными аспектами, требующими внимательного анализа. Установка ремонтных деталей, таких как втулки уплотнения, может привести к повышению напряжений в опасных сечениях вала. Эти дополнительные нагрузки могут значительно снизить прочность конструкции и привести к ее выходу из строя. Опыт успешных ремонтов подтверждает необходимость тщательной проверки и соблюдения всех стандартов при установке новых компонентов.



Рис. 2. Виды повреждения роторов турбин
а – трещина в расточке; б – разрушение ротора из-за многоциклового усталости

Нездоровые эксплуатационные режимы, включая высокие уровни вибраций и нагрузки, также демонстрируют отрицательное влияние на состояние вала. При многократных переключениях режимов работы возникают резкие изменения температуры и давления, что способствует ускоренному износу. Кроме того, чрезмерные нагрузки, превышающие предусмотренные проектом, могут вызывать критические повреждения вала [4].

Методы устранения неисправности. Методы их устранения необходимо рассматривать в контексте постоянного повышения требований к надежности и долговечности оборудования. Основное внимание стоит уделить диагностике, проведению ремонта и использованию новых технологий, которые позволяют значительно сократить время диагностики и избежать лишних затрат.

Первым этапом в устранении неисправностей вала ротора газовой турбины является его диагностика. Для этого применяется ряд методов, включая вибрационный анализ, термографию и ультразвуковое исследование. Вибрационный анализ позволяет существенно сократить время на определение источников неисправностей благодаря возможности непрерывного мониторинга состояния вала. Термические методы диагностики помогают в выявлении перегревов, которые могут привести к более серьезным повреждениям. Ультразвуковые технологии используются для обнаружения трещин и других дефектов, недоступных для визуального осмотра.

Когда неисправность выявлена, и требуется ее устранение, применяются различные способы ремонта. В зависимости от характера повреждения, может быть либо произведена замена поврежденных участков, либо выполнен точечный ремонт. В последние годы наметилась тенденция к использованию методов восстановительного ремонта, таких как наплавка и шлифовка, что позволяет продлить срок службы деталей без необходимости их полной замены [5]. Это особенно актуально для вала ротора, где недопустимо длительное отключение в процессе работы.

Современные технологии, такие как лазерная диагностика и неразрушающий контроль, предоставляют новые возможности для оценки состояния ротора и его элементов. Лазерная диагностика позволяет более точно определить геометрию и возможные деформации вала, что существенно улучшает качество ремонта и извлекает максимальную долговечность от восстановленных деталей. Использование неразрушающего контроля обеспечивает высокую степень надежности при оценке состояния вала без риска его повреждения.

Результаты и обсуждение. При выборе методов устранения неисправностей следует также учитывать экономический аспект. Как показывает практика, временные и финансовые затраты на нагрузочный ремонт в большинстве случаев оказываются ниже, чем простые, связанные с полной заменой оборудования. Исследования показывают, что применение методик ремонта без остановки работы агрегатов может значительно повысить эффективность эксплуатационных процессов. Эффективность технологий, которые позволяют избежать остановки, подтверждается успешным опытом различных энергетических компаний.

Каждый случай неисправности требует индивидуального подхода, который включает в себя как технические, так и эксплуатационные аспекты. Важно также внедрять системы управления, позволяющие собрать анализ данных на этапе эксплуатации для своевременной идентификации проблем и разработки оперативных мер по их устранению. Это позволит не только повысить безопасность и эффективность работы газовых турбин, но и снизить количество внеплановых ремонтов.

Вывод. Устранение неисправностей и профилактика их возникновения требуют комплексного анализа, постоянного мониторинга и внедрения современных технологий. Это позволит не только повысить надежность газовых турбин, но и значительно увеличить их срок службы, что в свою очередь будет способствовать более эффективному использованию энергетических ресурсов и снижению затрат на обслуживание. В конечном итоге, успешное решение проблем, связанных с неисправностями вала ротора, является залогом стабильной и безопасной работы газовых турбин, что имеет критическое значение для энергетической отрасли в целом.

Литература:

1. Дедюхин А.С., Андреев К.Д. Диагностика неисправностей газотурбинных установок с применением вибродиагностики // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2021. №5-1.
2. Смирнов А.Н., Быкова Н.В., Абабков Н.В., Фенстер Б.Р. Анализ повреждаемости роторов паровых турбин (обзор) // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. №2 (102).
3. Бирюков Р. В., Киселев Ю. В. Температурная диагностика роторных подшипников газотурбинных двигателей // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2014. №205.
4. Соколов М. П. Диагностика причин отказов наземных газотурбинных установок // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2006. №109.
5. Шафиков Р.Р. Экономическая эффективность применения методов ремонта газопроводов без остановки перекачки газа потребителю // Территория Нефтегаз. 2009. №4.

Turbine rotor shaft operation problems and malfunctions: causes and methods of elimination

Vashishina A. P.^{1,a}, Vashchishin S. P.¹, Zlydnev V. D.¹

¹Bryansk State Technical University, Bryansk, 50th Anniversary of October Boulevard, 7, Russia

^avashhi.anya@yandex.ru

Keywords: turbine rotor shaft, malfunction, breakdown.

The article analysis of the rotor shaft of a gas turbine has been carried out in order to identify malfunctions that occur during their operation. There are three main types of breakdowns: alternating stress bending, dynamic phenomena and vibrations. The main signs and causes of malfunctions and their effect on turbine operation have been identified.

УДК 666.97:537.633

Физические процессы влияния магнитной активации на этапы приготовления цементного теста в бетоносмесительных установках

Шаура А.С.^{1,a}, Федоров В.С.^{1,b}, Портнягина А.В.^{1,c}

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^ashauraas00@mail.ru, ^bfedorov.v.s@yandex.ru, ^cportnyagina_1408@mail.ru

Ключевые слова: Магнитная активация, бетонная смесь, физический процесс, бетон, магнитное поле.

Статья исследует метод магнитной активации бетонных смесей, направленный на улучшение их физико-механических свойств через управление гидратацией и структурой за счет воздействия магнитного поля (0,1–1,0 Тл) на воду, цемент и наполнители, что вызывает электромагнитные и магнетогидродинамические процессы: деструкцию водных ассоциатов, интенсификацию массопереноса, переориентацию гидратных фаз и кристаллографические изменения в компонентах, приводящие к снижению вязкости смеси, повышению удобоукладываемости, ускорению гидратации, формированию плотной микроструктуры цементного камня с улучшенной прочностью, а также сокращению расхода воды и пластификаторов. Применяемый в качестве дополнительного средства для достижения лучших показателей качества бетона, метод магнитной активации может использоваться в комбинации с механическим смешиванием в бетоносмесительных установках, что обеспечивает синергетический эффект и повышение эффективности технологического процесса. Данный подход демонстрирует экологичность и экономическую эффективность, требуя междисциплинарного подхода для оптимизации параметров и интеграции в строительные практики

Современные технологии модификации бетонных смесей направлены на улучшение их физико-механических свойств за счет управления процессами гидратации и структурообразования. Введение магнитной активации на этапе приготовления бетонной смеси позволяет целенаправленно модифицировать её микроструктуру за счёт ориентации

частиц наполнителя и цемента под действием магнитного поля. Это усиливает гидратацию, снижает дефектность, повышает прочность и долговечность бетона, сокращает энергозатраты и экологическую нагрузку, открывая перспективы для создания ресурсоэффективных материалов в строительстве. Одним из перспективных методов является магнитная активация компонентов бетона, основанная на воздействии магнитного поля на воду, цемент и минеральные наполнители. Физические процессы, происходящие при этом, приводят к существенным изменениям на молекулярном, коллоидном и макроскопическом уровнях, что в конечном итоге определяет эксплуатационные характеристики материала. Магнитная обработка бетонных смесей относится к методам физико-химической активации, изменяющим структуру жидкой и твердой фаз на молекулярном и надмолекулярном уровнях. При воздействии магнитного поля с индукцией $B = 0,1\text{--}1,0$ Тл в системе происходят сложные взаимосвязанные процессы [3] (Рис. 1):

Электромагнитные процессы, возникающие при магнитной активации водной фазы бетонной смеси, представляют собой комплекс взаимосвязанных физико-химических явлений, включающий поляризационную переориентацию дипольных молекул воды, индукцию лоренцевских сил, действующих на гидратирующие ионы, и формирование локальных электрокинетических потенциалов на границах раздела фаз. Эти процессы вызывают деструкцию крупных водных ассоциатов, интенсификацию массопереноса реакционноспособных компонентов и модификацию электрохимических условий на поверхности цементных частиц, что в совокупности приводит к оптимизации кинетики гидратации и формированию более совершенной микроструктуры цементного камня с улучшенными физико-механическими характеристиками. [4]



Рис. 1. Физические процессы, происходящие в бетонной смеси при её активации магнитным полем

Суть магнитогидродинамических явлений в бетонной смеси при магнитной активации заключается в возникновении упорядоченных микропотоков жидкости под действием лоренцевских сил, формировании конвективных вихревых структур и интенсификации массопереноса ионов, что приводит к дезагрегации цементных частиц, оптимизации распределения компонентов смеси и ускорению процессов гидратации за счет увеличения частоты эффективных столкновений реагирующих частиц и более полного вовлечения клинкерных фаз в реакции структурообразования.

Изменения кинетики гидратации цемента при магнитной активации бетонной смеси заключается в интенсификации массопереносных процессов и электрохимических взаимодействий на границе раздела фаз, что проявляется в ускорении начальных стадий гидратации (индукционного периода и фазы ускорения), увеличении степени превращения клинкерных минералов и формировании более однородной и плотной структуры гидратных новообразований за счет синергетического действия электромагнитных эффектов (поляризации молекул воды, возникновения лоренцевских сил и изменения электрохимических потенциалов) на молекулярном и ионном уровнях.

Суть структурных преобразований в твердеющем камне при магнитной активации бетонной смеси заключается в формировании более плотной и гомогенной микроструктуры за счет направленной переориентации гидратных новообразований, уменьшения дефектности межфазных границ и оптимизации порового пространства, что обусловлено комплексным воздействием магнитного поля на кинетику кристаллизации, процессы нуклеации и рост гидратных фаз, а также перераспределение компонентов в водно-цементной системе на всех стадиях твердения.

Данные физические процессы воздействия магнитного поля влияют на вязкость цементного теста, что в свою очередь, сказывается на удобоукладываемости, увеличении плотности структуры цементного камня и повышении прочностных характеристик [3]. Основные эффекты воздействия магнитного поля на бетонную смесь представлены на рисунке 2.

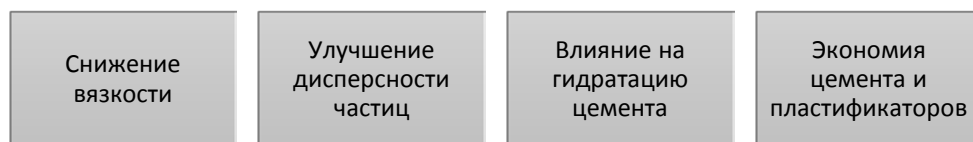


Рис. 2. Эффекты воздействия магнитного поля на бетонную смесь

Вязкость снижается в связи с изменением структуры воды: под воздействием магнитного поля крупные кластеры молекул воды разрушаются, что делает воду более "активной" и текучей. Снижение вязкости улучшает удобоукладываемость бетонной смеси, облегчая её распределение и уплотнение. [5]

Под улучшением дисперсности частиц понимается способствование магнитного поля более равномерному распределению частиц цемента и заполнителей в смеси. Это уменьшает внутреннее трение между частицами, что также снижает вязкость. Более равномерное распределение компонентов смеси улучшает её текучесть без добавления избыточного количества воды.

Магнитная обработка может ускорять начальные стадии гидратации цемента, что может временно увеличить вязкость смеси на ранних этапах. Однако в целом это способствует более быстрому формированию структуры бетона. После завершения начальной стадии гидратации вязкость снижается из-за улучшения микроструктуры смеси. [4]

За счёт снижения вязкости магнитная обработка позволяет уменьшить количество воды, необходимой для достижения требуемой удобоукладываемости. Это положительно сказывается на прочности бетона, так как избыток воды увеличивает пористость. Также возможно снижение дозировки пластификаторов, что делает процесс более экономичным.

Каждый из этих эффектов вносит свое улучшение в свойство бетонной смеси, но только комплексный подход качественно подобранной технологии применения магнитного поля на бетонную смесь позволяет получить оптимальные свойства готового цементного камня снижая его себестоимость.

Из всех физико-химических процессов воздействия магнитной активации на бетонную смесь можно выделить основные технологические процессы оказывающие наибольшее влияние на структуру цементного теста, к ним относятся: 1. Процесс влияния магнитного поля на воду и ионы в цементном тесте; 2. Изменение в кристаллической решетке цементных фаз; 3. Влияние на кинетику гидратации.

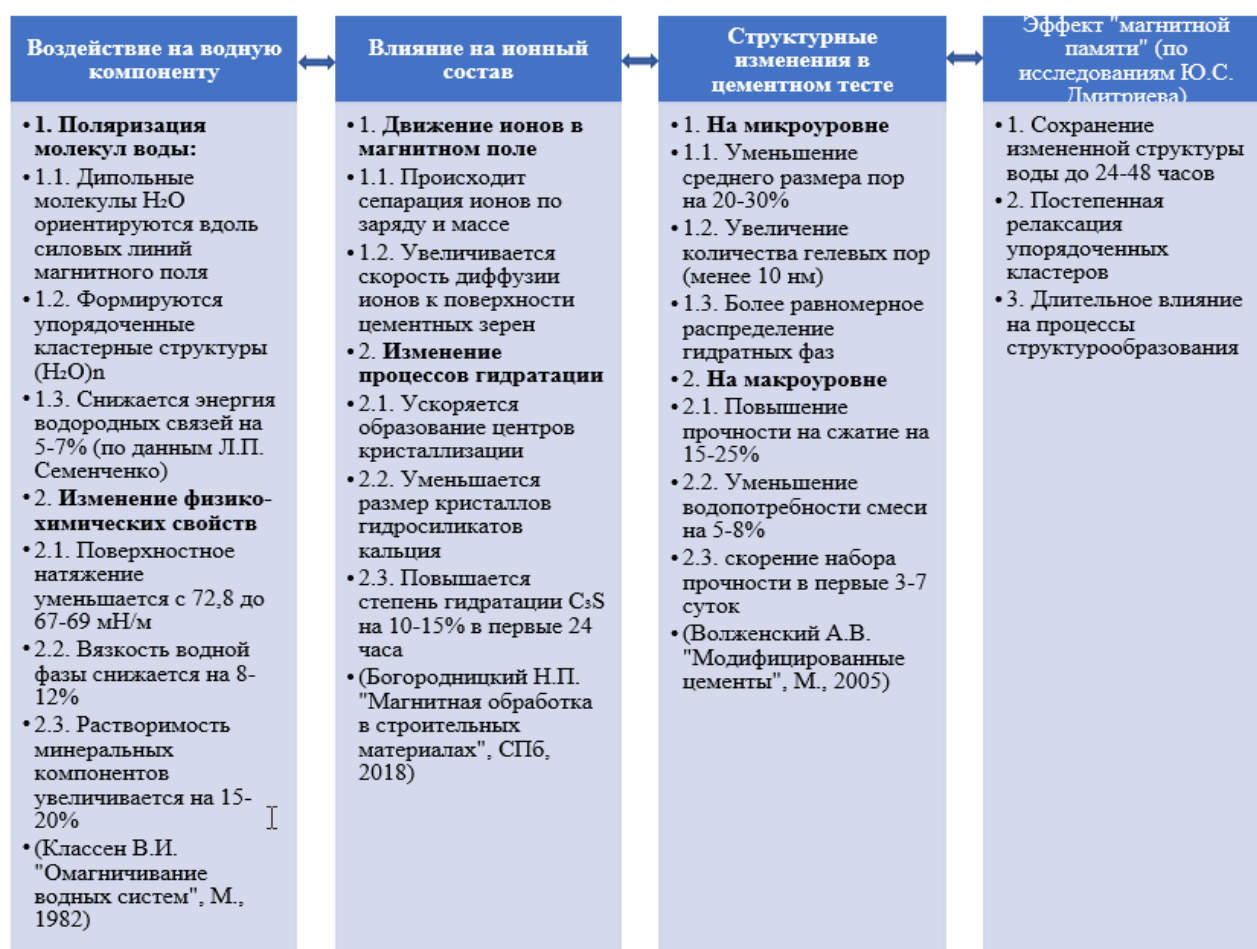


Рис. 3. Процесс влияния магнитного поля на воду и ионы в цементном тесте.

При воздействии магнитного поля на бетонную смесь в кристаллической решетке её компонентов наблюдаются следующие структурно-кристаллографические изменения

В клинкерных минералах (C_3S , C_2S) фиксируется деформация элементарных ячеек с изменением параметров на 0,5-1,2% и образование точечных дефектов

В гидратных фазах ($C-S-H$, $Ca(OH)_2$) происходит: уменьшение межплоскостных расстояний на 0,2-0,4 нм; 2. переориентация кристаллографических плоскостей; 3. увеличение микронапряжений на 15-20%. На атомарном уровне отмечают: 1. изменение

длин межатомных связей Ca-O ($\Delta d \approx 0,02-0,04$ Å); 2. перераспределение электронной плотности; 3. модификация водородных связей

Эти изменения, подтвержденные методами рентгеноструктурного [1] (Уманский Я.С., 1967) и электронно-микроскопического анализа [2] (Пинскер З.Г., 1973), приводят к повышению степени кристалличности на 15-20% и улучшению механических характеристик цементного камня.



Рис. 4. Процесс влияния магнитного поля на кинетику гидратации цемента.

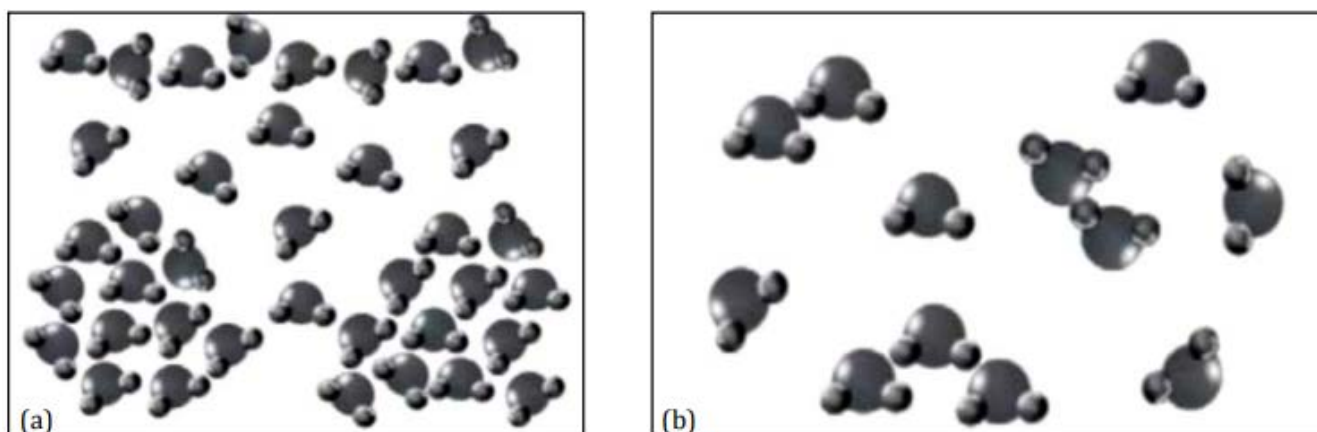


Рис. 5. Схематическое изображение воздействия магнитного поля на молекулы воды:

а - обычная вода; б - намагниченная вода

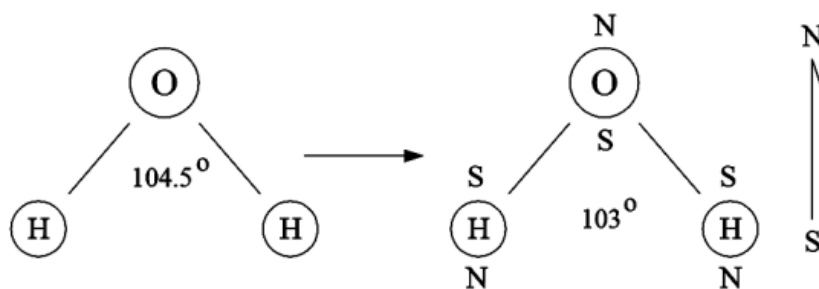


Рис. 6. Изменение угла водородных связей в молекуле после воздействия магнитных полей.

В обычной воде молекулы удерживаются вместе водородными связями, образуя крупные кластеры. При прохождении через магнитное поле размер этих кластеров уменьшается, а количество связанных молекул снижается. Магнитное поле ослабляет водородные связи, разрушая крупные кластеры и формируя более мелкие, но с более прочными связями.

Спектроскопические исследования подтвердили, что угол связи H-O-H уменьшается с $104,5^\circ$ до 103° под действием магнитного поля, что приводит к переориентации молекул (Рис.6.), снижению вязкости и поверхностного натяжения, что ускоряет гидратацию цемента. [6]

Магнитная активация представляет собой перспективный физический метод модификации бетонных смесей, сочетающий экологичность, экономическую эффективность и возможность точного контроля свойств конечного продукта. Дальнейшее развитие этого направления требует междисциплинарного подхода, объединяющего материаловедение, физику и строительную механику. Перспективы исследования влияния магнитных полей на бетонную смесь в бетоносмесительных установках связаны с возможностью управления микроструктурой материала за счёт направленной ориентации частиц наполнителя и цементного зерна, что интенсифицирует процессы гидратации, снижает дефектность (пористость, микротрещины) и повышает механическую прочность, морозостойкость и долговечность бетона. Комбинированное воздействие механического перемешивания в бетоносмесителе и магнитной активации смеси позволяет синергетически улучшить свойства бетона: магнитное поле ориентирует частицы наполнителя и цемента, интенсифицируя гидратацию, а механическое перемешивание обеспечивает равномерное распределение компонентов. Это снижает пористость, повышает прочность, морозостойкость и скорость твердения, сокращает энергозатраты и объём цемента, что способствует созданию экологичных высокоэффективных бетонов для ответственных конструкций. Использование магнитной обработки в бетоносмесительных установках позволяет сократить время твердения, уменьшить энергозатраты на производство и снизить экологическую нагрузку за счёт оптимизации состава смесей. Разработка таких технологий открывает путь к созданию «умных» бетонов с заданными свойствами для ответственных конструкций, включая сейсмостойчивые и высоконагруженные объекты, а также способствует развитию ресурсосберегающих методов в строительной индустрии.

Литература:

1. Уманский Я.С. Применение рентгеноструктурного анализа для изучения деформации кристаллических решёток клинкерных минералов.: М.: Наука. Рентгеноструктурный анализ кристаллических материалов, 1967.
2. Пинскер З.Г. Исследование изменений на атомарном уровне в гидратных фазах цемента. Л.: Химия. Электронная микроскопия в материаловедении, 1973.

3. Гвоздев А.А. Обзор методов активации бетона, включая магнитное воздействие. СПб.: Стройиздат. Физико-химические методы модификации бетонных смесей, 2010
4. Кузнецов В.В. Анализ кинетики гидратации и влияния внешних факторов на процесс. М.: Стройматериалы: Гидратация цемента и формирование структуры бетона., 2008.
5. Федоров В.С., Шаура А.С., Портнягина А.В., Савчук И.А., Актуальность использования магнитной активации в бетоносмесительных установках. Братск: БрГУ. «Механики XXI века», 2022
6. Mariam Farouk Ghazy, Metwally Abd Allah Abd Elaty, Omar Hussein Khalifa. Properties of Portland cement concrete cast with magnetized water: a review. Challenge journal of concrete research letters 12 (2), 2021. с 58–71

Physical processes of the influence of magnetic activation on the stages of preparation of cement dough in concrete mixing plants

Shaura A.S.^{1,a}, Fedorov V.S.^{1,b}, Portnyagina A.V.^{1,c}

¹Bratsk State University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia

^ashauraas00@mail.ru, ^bfedorov.v.s@yandex.ru, ^cportnyagina_1408@mail.ru

Keywords: Magnetic activation, concrete mix, physical process, concrete, magnetic field.

The article explores the method of magnetic activation of concrete mixtures aimed at enhancing their physical-mechanical properties by controlling hydration and structure through the application of a magnetic field (0.1–1.0 T) to water, cement, and fillers. This induces electromagnetic and magnetohydrodynamic processes, including the destruction of water associates, intensification of mass transfer, reorientation of hydrate phases, and crystallographic changes in components. These effects lead to reduced mixture viscosity, improved workability, accelerated hydration, the formation of a dense microstructure in the cement stone with enhanced strength, as well as reduced water and plasticizer consumption. Employed as an auxiliary technique to achieve superior concrete quality, the magnetic activation method can be combined with mechanical mixing in concrete batching plants, creating a synergistic effect and improving the efficiency of the technological process. This approach demonstrates environmental friendliness and cost-effectiveness, while requiring a multidisciplinary effort to optimize parameters and integrate it into construction practices.

УДК 629.3.01

Определение параметров сборной модели отвала бульдозера

Гулий И.Е.^{1,a}, Панченко Д.Р.^{1,b}, Осипов М.С.^{1,c}, Тимофеев Е.Д.^{1,d},
Погонина А.М.^{1,e}

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет(МАДИ),
125319, Ленинградский проспект, д.64, Москва, Россия

^avanyagulyi25@gmail.com, ^bpanchenko.diman2574@mail.ru, ^cmixakir2103@gmail.com,

^devgenytimofeev2857@yandex.ru, ^eshur-shu@mail.ru

Ключевые слова: сборный бульдозерный отвал, призма волочения, параметры сборного отвала, изменяемая форма отвала.

Работа посвящена исследованию новой универсальной формы бульдозерного отвала. Данная форма позволяет изменять геометрию отвала в зависимости от типа грунта. В

работе выполнены исследования по определению оптимальных параметров отвала, а также проведены вычисления призм волочения. Разработаны рекомендации по форме отвала в зависимости от условий использования. Определены призмы волочения, коэффициенты наполняемости. Выведена методика расчета коэффициентов в зависимости от типа отвала и типа грунта.

В условиях интенсивного развития и увеличения масштабов строительства, продукты, связанные с земляными работами, становятся важными элементами любой строительной или горнодобывающей деятельности. Бульдозеры занимают центральное место среди техники, используемой для обработки, перемещения и планировки грунта. На эффективность этих процессов значительно влияет форма бульдозерного отвала, так как именно она определяет, как будет проходить взаимодействие между машиной и материалом. Существует множество различных форм бульдозерных отвалов, каждая из которых спроектирована с учетом специфических условий эксплуатации и требований к производительности.

Цель данной работы заключается в всестороннем исследовании формы сборного бульдозерного отвала с целью выявления их оптимальных конструктивных решений для различных условий эксплуатации. Исследование предполагает как теоретический, так и практический подход, включая анализ существующих моделей и сравнительное тестирование различных форм отвала в реальных условиях работы.

Проблема исследования заключается в том, что для каждого вида земельных работ необходимо правильно подбирать профиль бульдозерного отвала, также немаловажным фактором является категория разрабатываемого грунта и его влажность. Выбор рационального профиля отвала – неотъемлемая часть подготовки к запланированным работам с грунтом.

Объектом исследования является процесс среза и накопления грунта перед отвалом. Этот процесс включает в себя взаимодействие режущей кромки отвала с грунтом.

Предметом исследования является влияние конструкции бульдозерного отвала на объём призмы волочения.

Цель: всестороннее исследование форм бульдозерного отвала с целью выявления их оптимальных конструктивных решений для различных условий эксплуатации.

Исследование предполагает как теоретический, так и практический подход, включая анализ существующих моделей и сравнительное тестирование различных форм отвала в реальных условиях работы.

Задачи:

1. Проанализировать существующие формы бульдозерных отвалов.
2. Оценить влияние различных форм отвала на производительность бульдозеров в зависимости от конкретных условий их работы.
3. Провести экспериментальные испытания на практике для определения наиболее эффективных форм.
4. Разработать рекомендации на основе опыта по оптимизации форм бульдозерных отвалов на основе опыта.

Для проведения научного эксперимента для определения оптимального типа отвала была разработана экспериментальная установка (рис.1.) и специальная конструкция сборного отвала, которая позволяет благодаря быстрой замене секций менять форму отвала. Модель сборного отвала состоит из основной платформы, которая крепится к бульдозеру и быстросъемных секций с заданными радиусами скругления. Такая форма позволяет моделировать разные формы отвалов, включая защитные козырьки. Секции имеют цветовую дифференциацию.



Рис.1. Экспериментальная установка, прямой отвал

Чтобы определить эффективность работы различных типов отвалов было проведено 4 серии экспериментов с бти кратным повторением с разными конструкциями отвалов: прямой без ножа, прямой с ножом, прямой с ножом и защитным козырьком, прямой с ножом и защитным козырьком увеличенного радиуса. В каждом эксперименте была подготовлена полоса грунта толщиной 30 мм и длиной 2000 мм, а после - уплотнена.

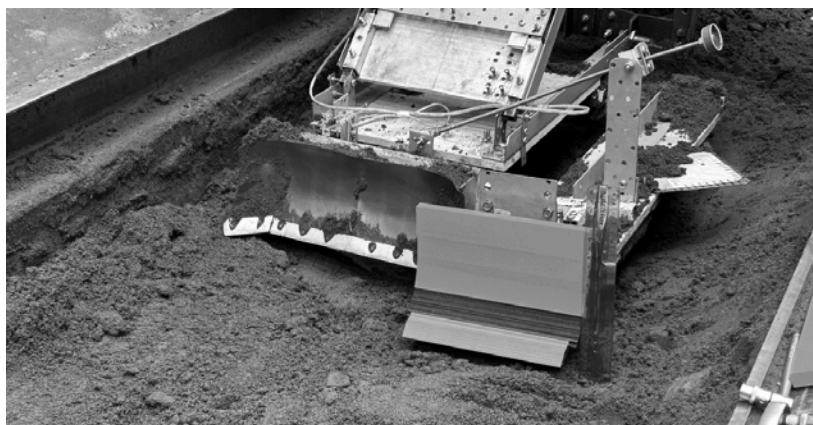


Рис.2. Форма №2

После каждого эксперимента было осуществлено взвешивание призмы волочения с помощью динамометрических весов.



Рис.3. Результат эксперимента

Для оценки влияния различных форм отвала на эффективность работы бульдозеров приведем фрагмент расчета его производительности:

$$\Pi = \frac{V_{\text{пр}}}{T_{\text{ц}}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (1)$$

Отметим, что на производительность бульдозера прямо пропорционально влияет объем призмы волочения $V_{\text{пр}}$:

$$V_{\text{пр}} = \frac{h_{\text{отв}}^2 \cdot b_{\text{отв}} \cdot k_{\text{отв}}}{2 \cdot k_{\text{пр}} \cdot k_{\text{рых}}}, \text{ м}^3 \quad (2)$$

где $h_{\text{отв}}$ – полная высота отвала, м; $b_{\text{отв}}$ – длина отвала, м; $k_{\text{отв}}$ – коэффициент, учитывающий тип отвала; $k_{\text{пр}}$ – коэффициент, учитывающий особенности формы призмы волочения; $k_{\text{рых}}$ – коэффициент разрыхления грунта при разработке.

После получения результатов всех экспериментов все полученные данные были занесены в таблицу 3.

Таблица 3

Результаты испытаний				
Тип конструкции отвала	Объём призмы волочения, м ³	Производительность, м ³ /с	Коэффициент наполнения	Коэффициент налипания
Прямой без ножа	0,009	0,00045	1	0,95
Прямой с ножом	0,011	0,00055	1,1	0,9
Прямой с ножом и защитным козырьком	0,015	0,00075	1,25	0,8
Прямой с ножом и защитным козырьком большего радиуса	0,013	0,00065	1,3	0,7

Вторым этапом обработки результатов стала оценка объёма призмы волочения, коэффициента наполнения и коэффициента налипания из таблицы 3. Для обработки полученных результатов были определены зависимости призмы волочения, коэффициента наполнения и коэффициента налипания от формы сборного отвала. сборных секционных форм отвала (рис.4-6)

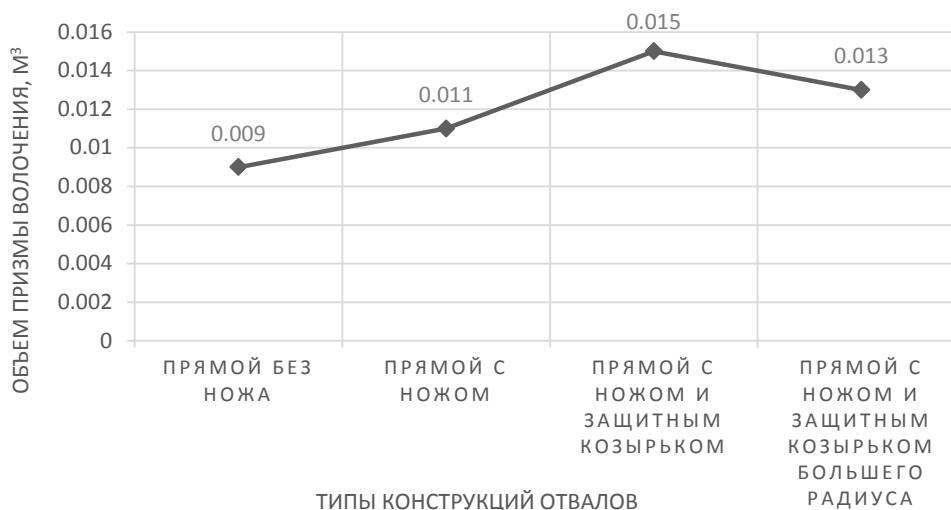


Рис.4. График зависимости объема призмы волочения от конструкции отвала.



Рис.5. График зависимости коэффициента наполнения от конструкции отвалов.

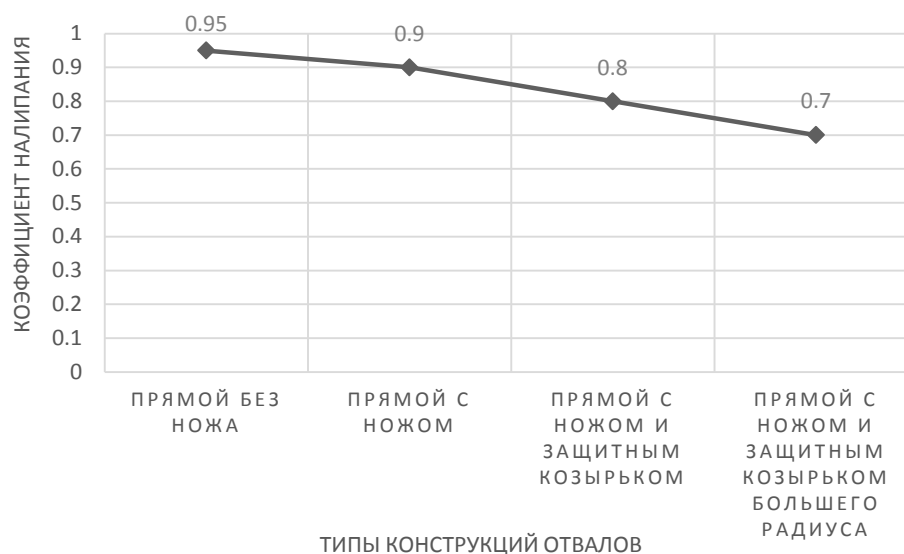


Рис.6. График зависимости коэффициента налипания от конструкции отвалов.

Проанализировав полученные графики (рис. 4-6) с экспериментальными данными, можно сделать вывод о том, что коэффициент налипания оказывает наибольшее влияние на объем призмы волочения среди остальных коэффициентов.

Сравнив работу нескольких типов сборных отвалов, установлено, что прямой отвал с ножом и защитным козырьком является самым универсальным. Объем призмы волочения при работе таким отвалом составляет $0,013 \text{ м}^3$; коэффициент наполнения 1,25; коэффициент налипания: 0,8. Потери грунта являются незначительными.

Направлением дальнейших исследований является:

- определение оптимального радиуса закругления сборного отвала;
- определение параметров взаимодействия сборного отвала с другими типами грунтов и материалов;
- расчет эффективности замены секций сборного отвала при работе бульдозера.

Литература:

1. Вавилов, А. В. Строительные машины и оборудование: учебное пособие / А. В. Вавилов, А. Л. Дашко, А. А. Замула. — Минск: РИПО, 2021. — 330 с.
2. Кузнецов, В. В. Машины для земляных работ: учебно-методическое пособие / В. В. Кузнецов. — Брянск: Брянский ГАУ, 2019. — 443 с.

3. Основы горного дела: учебное пособие для вузов / О. С. Брюховецкий, С. В. Иляхин, А. П. Карпиков, В. П. Яшин. — 4-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2024. — 352 с.
4. Сачук, Ю. С. Организация работы транспортно-технологических средств и комплексов при строительстве объектов транспортной инфраструктуры: учебно-методическое пособие / Ю. С. Сачук, И. К. Потеряев, А. Ю. Сачук. — Омск: СибАДИ, 2022.
5. Технологические процессы в строительстве. Работы нулевого цикла: учебное пособие / составитель Л. И. Елисеева. — Чита: ЗабГУ, 2019. — 172 с.

Determination of the parameters of the assembled model of the bulldozer blade

Gulyi I.E.^{1,a}, Panchenko D.R.^{1,b}, Osipov M.S.^{1,c}, Timofev E.D.^{1,d},
Pogonina A.M.^{1,e}

¹Moscow Automobile and Road State University, 64, Leningradskii prospect, Moscow, 125319, Russia

^aVanyagulyi25@gmail.com, ^bpanchenko.diman2574@mail.ru, ^cmixakir2103@gmail.com,

^dEvgenyTimofeev2857@yandex.ru, ^eshur-shu@mail.ru.

Keywords: prefabricated bulldozer blade, drawing prism, parameters of a prefabricated blade, changeable blade shape.

The work is devoted to the study of a new universal form of a bulldozer blade. This shape allows you to change the geometry of the dump depending on the type of soil. In the work, studies were carried out to determine the optimal parameters of the blade, as well as calculations of drawing prisms. Recommendations on the shape of the blade have been developed depending on the conditions of use. Drawing prisms and filling coefficients are determined. A method for calculating coefficients is derived depending on the type of dump and the type of soil.

УДК 621.923.01

Актуальность информационных технологий при обработке бетонных поверхностей

Дробит А.А.^{1,a}, Герасимов С.Н.^{2,b}

¹Иркутский Национальный Исследовательский Технический Университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия,

²Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^adrars3883@icloud.Com, ^bsdm_gerasimov@rambler.ru

Ключевые слова: бетонные поверхности, информационные технологии, автоматизация, 3D-моделирование, роботизация, контроль качества, строительные материалы.

В статье рассматриваются теоретические и практические аспекты обработки бетонных поверхностей с акцентом на применение информационных технологий (ИТ). Исследование охватывает свойства бетона, принципы его обработки, а также современные методы автоматизации, роботизации и мониторинга. Проводится сравнение традиционных и технологически продвинутых подходов, что позволяет оценить преимущества ИТ в повышении точности, скорости и качества работ. Также

рассматриваются сложности и вызовы, связанные с внедрением ИТ. Результаты демонстрируют, что интеграция ИТ в процессы обработки бетона является ключевым фактором повышения эффективности строительной отрасли.

Введение.

Бетон — один из наиболее распространенных строительных материалов, используемых в современном мире. Его популярность обусловлена высокой прочностью, долговечностью и относительно низкой стоимостью. Однако обработка бетонных поверхностей, включая шлифовку, полировку, нанесение покрытий и контроль качества, остается сложным и ресурсозатратным процессом.

С развитием информационных технологий (ИТ) появились новые возможности для оптимизации этих процессов. ИТ позволяют автоматизировать рутинные операции, повысить точность и снизить зависимость от человеческого фактора. В данной статье рассматриваются теоретические основы обработки бетонных поверхностей, а также практические аспекты применения ИТ на каждом этапе. Особое внимание уделяется сложностям и вызовам, связанным с внедрением ИТ.

Теоретические основы.

1. Свойства бетона

Бетон — это композитный материал, состоящий из цемента, воды, заполнителей (песка, щебня) и добавок. Его основные свойства включают:

- Прочность: способность выдерживать механические нагрузки.
- Пористость: наличие микропор, которые влияют на влагопоглощение и долговечность.
- Адгезия: способность поверхности взаимодействовать с покрытиями и другими материалами.

Эти свойства определяют требования к обработке бетонных поверхностей. Например, высокая пористость требует тщательной подготовки перед нанесением покрытий, а низкая адгезия может привести к отслаиванию материалов.

2. Принципы обработки бетонных поверхностей

Обработка бетонных поверхностей включает несколько этапов:

1. Подготовка: очистка, устранение дефектов и выравнивание.
2. Шлифовка и полировка: удаление неровностей и придание гладкости.
3. Нанесение покрытий: защита поверхности от внешних воздействий и улучшение эстетики.
4. Контроль качества: проверка параметров поверхности (ровность, прочность, адгезия).

Каждый этап требует точности и соблюдения технологических норм, что делает процесс трудоемким и сложным.

Процессы обработки бетонных поверхностей и применение ИТ

1. Подготовка поверхности

Теоретические аспекты:

Подготовка поверхности — это первый и наиболее важный этап, так как от него зависит качество последующих работ. Основные задачи:

- Удаление загрязнений (пыль, масло, краска).
- Устранение дефектов (трещины, сколы).
- Выравнивание поверхности.

Традиционные методы (без ИТ):

- Ручная очистка с использованием металлических щеток и шпателей.
- Механическая обработка с помощью шлифовальных машин.
- Визуальный осмотр для выявления дефектов.

Минусы традиционных методов:

- Низкая точность: Визуальный осмотр и ручные методы часто приводят к пропуску мелких дефектов, что снижает качество подготовки.
- Высокие трудозатраты: Ручная очистка и обработка требуют значительных временных и физических затрат.
- Риск ошибок: Человеческий фактор может привести к неравномерной обработке и пропуску проблемных участков.

Применение ИТ:

- 3D-сканирование: создание цифровой модели поверхности для точного выявления дефектов.
- Программное обеспечение для анализа данных: автоматическое определение проблемных участков и создание плана работ.

Примеры применения ИТ:

- Компания Trimble предлагает решения для 3D-сканирования бетонных поверхностей, которые позволяют создавать точные цифровые модели для дальнейшей обработки.
- Программное обеспечение Bentley Systems используется для анализа данных сканирования и автоматического создания планов работ.

Преимущества ИТ:

- Повышение точности выявления дефектов.
- Сокращение времени подготовки.
- Минимизация человеческого фактора.

2. Шлифовка и полировка

Теоретические аспекты:

Шлифовка и полировка необходимы для выравнивания поверхности, устранения неровностей и придания гладкости. Эти процессы также улучшают адгезию покрытий.

Традиционные методы (без ИТ):

- Использование ручных шлифовальных машин.
- Ручная регулировка давления и скорости обработки.
- Визуальный контроль качества.

Минусы традиционных методов:

- Неравномерная обработка: Ручное управление давлением и скоростью часто приводит к неравномерной шлифовке и полировке.
- Высокая утомляемость операторов: Физическая нагрузка на операторов снижает производительность и повышает риск ошибок.
- Риск повреждения поверхности: Чрезмерное давление или неправильная скорость обработки могут привести к повреждению бетона.

Применение ИТ:

- Роботизированные шлифовальные системы: автоматическое управление давлением и скоростью.
- Системы автоматического контроля: датчики, отслеживающие глубину обработки в реальном времени.

Примеры применения ИТ:

- Компания Husqvarna разработала роботизированные шлифовальные машины, которые автоматически регулируют давление и скорость обработки.
- Системы Dustcontrol используются для мониторинга качества обработки в реальном времени.

Преимущества ИТ:

- Равномерная обработка поверхности.
- Снижение трудозатрат.

- Повышение безопасности для операторов.

3. Нанесение покрытий

Теоретические аспекты:

Нанесение покрытий необходимо для защиты бетона от внешних воздействий (влаги, химических веществ, механических повреждений) и улучшения его эстетики.

Традиционные методы (без ИТ):

- Ручное нанесение с использованием валиков, кистей или распылителей.
- Ручное смешивание компонентов покрытия.

Минусы традиционных методов:

- Неравномерное нанесение: Ручное нанесение часто приводит к неравномерному распределению покрытия.

- Риск ошибок при смешивании: Неправильное смешивание компонентов может снизить качество покрытия.

- Высокие трудозатраты: Ручное нанесение требует значительных временных и физических затрат.

Применение ИТ:

- Роботы-маляры: точное нанесение покрытий по заданным параметрам.
- Автоматические системы смешивания: обеспечение однородности состава.

Примеры применения ИТ:

- Компания Graco предлагает роботизированные системы для нанесения покрытий, которые обеспечивают равномерное нанесение и снижение расхода материалов.

- Системы Sika используются для автоматического смешивания компонентов покрытий.

Преимущества ИТ:

- Равномерное нанесение покрытий.
- Снижение расхода материалов.
- Повышение качества и долговечности покрытий.

4. Контроль качества

Теоретические аспекты:

Контроль качества включает проверку ровности, прочности, адгезии и других параметров поверхности. Это важный этап, так как он определяет долговечность и надежность конструкции.

Традиционные методы (без ИТ):

- Визуальный осмотр.
- Ручные измерения с использованием уровней и других инструментов.

Минусы традиционных методов:

- Субъективность оценок: Визуальный осмотр зависит от опыта и внимательности оператора.

- Низкая точность измерений: Ручные измерения часто менее точны, чем автоматизированные методы.

- Высокие трудозатраты: Ручной контроль качества требует значительных временных затрат.

Применение ИТ:

- Датчики и системы мониторинга: отслеживание параметров в реальном времени.
- Программное обеспечение для анализа данных: автоматическое выявление отклонений.

Примеры применения ИТ:

- Компания Proseq предлагает системы для неразрушающего контроля качества бетона, которые используют ультразвуковые и радиоволновые технологии.

- Программное обеспечение Autodesk BIM 360 используется для анализа данных мониторинга и автоматического выявления отклонений.

Преимущества ИТ:

- Высокая точность измерений.
- Оперативное выявление и устранение дефектов.
- Снижение трудозатрат.

Сложности и вызовы внедрения ИТ.

1. Высокая стоимость оборудования

Одной из основных проблем внедрения ИТ является высокая стоимость оборудования и программного обеспечения. Например, роботизированные шлифовальные машины и системы 3D-сканирования требуют значительных инвестиций, что может быть недоступно для небольших строительных компаний.

2. Необходимость обучения персонала

Использование ИТ требует квалифицированного персонала, который может работать с современным оборудованием и программным обеспечением. Обучение сотрудников может быть дорогостоящим и времязатратным процессом.

3. Зависимость от качества данных

Эффективность ИТ во многом зависит от качества исходных данных. Например, неточности в 3D-сканировании могут привести к ошибкам в обработке поверхности.

4. Технические ограничения

Некоторые технологии, такие как роботизированные системы, могут быть ограничены в применении на сложных объектах с нестандартной геометрией.

5. Интеграция с существующими процессами

Внедрение ИТ часто требует перестройки существующих процессов, что может вызвать сопротивление со стороны сотрудников и увеличить время адаптации.

Обсуждение

Внедрение информационных технологий в обработку бетонных поверхностей демонстрирует значительные преимущества по сравнению с традиционными методами. Однако существуют и вызовы, такие как высокая стоимость оборудования и необходимость обучения персонала. Тем не менее, с развитием технологий и снижением их стоимости, можно ожидать более широкого применения ИТ в строительной отрасли.

Заключение.

Информационные технологии играют ключевую роль в оптимизации процессов обработки бетонных поверхностей. Их применение на каждом этапе — от подготовки до контроля качества — позволяет повысить точность, скорость и качество работ. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку более доступных и универсальных решений, а также на интеграцию ИТ в стандартные строительные процессы.

Литература:

1. Баженов Ю.М., Алимов Л.А., Воронин В.В. Технология бетона. - М.: АСВ, 2011. - 528 с.
2. Хамзин С.К., Карасев А.В. *Технология монолитного бетона и железобетона*. — М.: Издательский центр «Академия», 2014. — 304 с.
3. Лабораторный контроль качества бетона // Официальный сайт НИИЖБ им. А.А. Гвоздева. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.niizhb.ru/> (дата обращения: 08.03.2025).
4. Роботизированная шлифовка бетона // Официальный сайт Husqvarna Россия. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.husqvarna.com/ru/> (дата обращения: 05.03.2025).
5. 3D-сканирование в строительстве // Trimble Solutions Corporation. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.trimble.com/ru> (дата обращения: 01.03.2025).

6. Технологии нанесения защитных покрытий // Официальный сайт Sika Russia. [Электронный ресурс]. URL: <https://rus.sika.com/> (дата обращения: 03.03.2025).

7. Автоматизированные системы контроля качества // Официальный сайт компании «Процесс-Контроль». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.processcontrol.ru/> (дата обращения: 03.03.2025).

Relevance of information technologies in the processing of concrete surfaces

Drobit A.A.^{1,a}, Gerasimov S.N.^{2,b}.

¹Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, Russia

¹ Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

^adrars3883@icloud.com, ^bsdm_gerasimov@rambler.ru

Keywords: concrete surfaces, information technology, automation, 3D modeling, robotics, quality control, construction materials.

The article examines the theoretical and practical aspects of concrete surface processing, focusing on the use of information technologies (IT). The study covers the properties of concrete, the principles of its processing, as well as modern methods of automation, robotics, and monitoring. A comparison is made between traditional and technologically advanced approaches, allowing an assessment of the advantages of IT in improving accuracy, speed, and quality of work. The challenges and difficulties associated with the implementation of IT are also discussed. The results demonstrate that the integration of IT into concrete processing workflows is a key factor in enhancing the efficiency of the construction industry.

УДК 622.271

Сравнительный анализ техники, применяемой при разработке месторождений открытым способом

Архипов А.Б.^{1,a}

¹Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, ул. Тургенева, 51, г. Хабаровск, Россия

^aalekseyarhipov97@icloud.com,

Ключевые слова: открытые горные работы, самосвал, экскаватор.

Разработка месторождений открытым способом зачастую связана с большими объемами вскрышных пород, а это увеличивает расстояние их транспортировки, вследствие чего экономически становится дороже производить работы по выемке полезного ископаемого. Открытый способ добычи полезных ископаемых является привлекательным к применению благодаря преимуществам: технологического, технического, организационного, социального и экологического характера, в сравнении с разработкой месторождений подземным способом. Открытый способ разработки месторождений выгодно отличается: высокой производительностью труда, снижением себестоимости продукции, экономией производственных ресурсов производства, сокращением в 2-3 раза и более сроков строительства предприятий аналогичной мощности,

снижением потерь полезных ископаемых в недрах, комфортными и безопасными условиями труда. На открытых горных работах применяется различная карьерная техника. Но в условиях санкционных ограничений возникли проблемы поставок некоторых видов горного оборудования: большегрузных карьерных самосвалов, гидравлических экскаваторов, проходческого и очистного оборудования западного производства и др. В связи с этим в статье рассматривается возможность применения экскаваторов и автосамосвалов отечественного производства взамен импортного, применяемого на Малмыжском золото-медно-порфировом месторождении.

Введение. Важной составляющей экономики Российской Федерации является добыча полезных ископаемых [1]. Современная техника и технологии добычи руд позволяют вести открытые горные работы на больших глубинах, однако в практике их применения при разработке мощных крутопадающих рудных тел возникает ряд серьезных проблем. На подавляющем большинстве глубоких карьеров горные работы достигли уже таких глубин, при которых резко увеличиваются объемы вскрышных пород, расстояния их транспортирования, возрастает себестоимость добычи [2-4]. Добыча полезных ископаемых почти на 80% осуществляется открытым способом [5-6]. На Дальнем Востоке открытым способом разрабатываются и подготавливаются к освоению ряд месторождений, в том числе медьсодержащие: Малмыжское, Песчанка, Удоканское, Кун-Маньё и Шануч.

Высокий удельный вес открытого способа добычи полезных ископаемых во всех отраслях горнодобывающей промышленности обусловлен преимуществами экономического, технического, технологического, экологического, организационного и социального характера по сравнению с подземным способом и прежде всего следующим: экономией производственных ресурсов, высокой производительностью труда, снижением себестоимости продукции, сокращением в 2-3 раза и более сроков строительства предприятий одинаковой мощности, снижением потерь полезных ископаемых в недрах до 1-5%, безопасными и более комфортными условиями труда [7-11].

В настоящее время на основе интенсификации и повышении производительности труда, связанными с увеличением объёмов добычи полезных ископаемых и необходимостью повышения эффективности производства, создается новое и совершенствуется действующее горное оборудование: буровые агрегаты, гидравлические и механические лопаты, драглайны, колесные карьерные погрузчики, компактные роторные экскаваторы, самоходные колесные скреперы, автосамосвалы, тяговые агрегаты и большегрузные вагоны, колесные и гусеничные бульдозеры.

Обсуждение. Основными производственными процессами при разработке крепких пород на открытых месторождениях являются проведение буровзрывных работ, погрузка горной массы и ее транспортирование. К примеру, на Малмыжском золото-медно-порфировом месторождении, расположенном в Нанайском районе Хабаровского края (разрабатывается компанией «Амур Минералс»), применяются карьерные автосамосвалы Terex trucks TA 400 (производство США) и гидравлические экскаваторы Hyundai R520LC-9S (Южная Корея).

В условиях ограничительных санкций, поставка зарубежного оборудования усложнена и в некоторых случаях недоступна. Существуют реальные проблемы поставок отдельных видов горного оборудования, в частности карьерных автосамосвалов и гидравлических экскаваторов. Применение техники отечественного производства является выходом из текущего положения. Для этого было проведено сравнение используемых на Малмыже автосамосвалов и экскаваторов с аналогичными образцами зарубежного и отечественного производства доступными для приобретения.

Зарубежные экскаваторы Hyundai R520LC-9S, Caterpillar 349 и российский ЧЕТРА Е520 (рис. 1) обладают схожими характеристиками (табл. 1). Но в силу того, что приобрести

иностранную технику экономически более затратно и/или невозможно, выбор российского производителя является рациональным альтернативным решением.



Рис. 1. Экскаватор Четра E520

Таблица 1

Основные технические характеристики экскаваторов

Параметр	Hyundai R520LC-9S	Caterpillar 349	Четра E520
Рабочий вес	52400 кг	47700 кг	51000 кг
Мощность двигателя	342 кВт (464 л.с.)	302 кВт (405 л.с.)	300 кВт (408 л.с.)
Объем ковша	3,0 м³	2,14 м³	3,2 м³
Глубина копания	до 6,13 м	до 8 м	До 7,2 м

По данным: <https://hyundai.ru.com/product/gusenichnyy-ekskavator-hyundai-r520lc-9s?ysclid=m8p61jo9cf165378112>; <https://shop.roads-pro.ru/product/gidravlicheskiy-ekskavator-cat-349>; <https://chetra-kuzbass.ru/technique/ekskavatory/gusenichnyy-ekskavator-chetra-e520/>

Экскаватор Четра E250 отличается довольно высокой экономичностью, т.к. гидравлическая система позволяет перераспределять мощность, увеличивая производительность экскаватора и снижая при этом расход топлива.

Далее рассмотрим технику для перевозки горной массы. На Малмыжском месторождении используют самосвалы марки Terex Trucks TA400, для сравнения берем зарубежный аналог Caterpillar 349 и российский Тонар-45251 (рис. 2), имеющие сходные технические характеристики (табл. 2).



Рис. 2. Автосамосвал Тонар-45251

Таблица 2

Основные технические характеристики карьерных самосвалов

Параметр	Terex Trucks TA400	Caterpillar 740B	Тонар - 45251
Грузоподъемность	38 тонн	39,5 тонн	45 тонн
Мощность двигателя	336 кВт (450 л.с.)	364 кВт (495 л.с.)	382 кВт (520 л.с.)
Скорость движения	67 км/ч	54 км/ч	45 км/ч
Двигатель	Detroit series 60	CAT C15	Yuchai YC6K520-GT30
Вес без нагрузки	30 тонн	34 тонны	24,5 тонны

По данным: <https://www.snabus.ru/adt/terex-articulated-dump-trucks/terex-ta400-articulated-dump-truck/>; <https://www.inopressworld.ru/adt/caterpillar-articulated-dump-trucks/caterpillar-740b-ej-articulated-dump-truck/>;

<https://tonar.info/upload/iblock/c57/yjzbltaqgvmntgak7ywxakemyes82zu.pdf?ysclid=m8p6dem8ls150680594>

Кроме этого, транспортно-заготовительные работы (ТЗР) компании, которые непосредственно связаны с процессом заготовления и доставки материалов в организацию, и запчасти для российского оборудования стоят значительно дешевле. В таблице 3 показаны укрупненные расчеты стоимости ТЗР рассматриваемой техники, а также расход топлива на 100 машино-часов работы, которые подтверждают предпочтительность приобретения и обслуживания машин отечественного производства.

Таблица 3

Стоимость затрат на обслуживание единицы техники (тыс. руб.)

Наименование	Ст-ть един.*	ТЗР 15%	Ст-ть с ТЗР	Затраты на запчасти в год 10%	Общая ст-ть	Средний расход дизтопл., л/маш-час	Цена 1 кг ДТ (л), руб.	Расход на 100 маш. час
Экскаваторы								
Hyundai R520LC-9S	23000	3450	26450	2300	28750	34,5	75	258,75
Caterpillar 349	29000	4350	33350	2900	36250	46		345
Четра E520	19000	2850	21850	1900	23750	22,5		168,75
Самосвалы								
Terex Trucks TA400	22500	3375	25875	2250	28125	22	75	165
Caterpillar 740B	33000	4950	37950	3300	41250	27,9		209,25
Тонар - 45251	13500	2025	15525	1350	16875	20		150

Выполнено автором.

*Стоимость единицы техники принималась по официальным данным компаний-дилеров по закупке и продаже техники

Вывод.

Горнодобывающая отрасль в целом проводит оперативную адаптацию к изменениям внешних условий [12], однако на текущий момент зависимость от импорта остается. Высокую долю технического парка дальневосточных предприятий составляют машины производства Китайской Народной Республики, по своим качественным характеристикам в ряде случаев существенно уступающим образцам техники ведущих мировых производителей. В настоящее время Правительством РФ проводится политика по обеспечению импортозамещения в различных отраслях промышленности, в связи с чем в ближайшие годы возможно ожидать более широкое применение отечественного горного и транспортного оборудования при разработке полезных ископаемых.

Литература:

1. Архипова Ю.А. Современное состояние титановорудной базы Дальнего Востока России и перспективы ее освоения // Региональная экономика: теория и практика. 2010. № 32. С. 36-43.
2. Трубецкой К.Н., Захаров В.Н., Галченко Ю.П. Природоподобные и конвергентные технологии при освоении минеральных ресурсов литосферы // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. №6. С. 560-566.
3. Чебан А.Ю., Хрунина Н.П. Техника и технологии разработки угольных разрезов Приамурья и перспективы их развития // Маркшейдерия и недропользование. 2015. №1. С. 19-21.
4. Юматов Б.П., Валатка З.И., Секисов А.Г., Зыков Н.В. Управление рудо-потоками на карьерах с использованием ЭВМ // Горный журнал. 1984. №12. С. 33-41.
5. Чебан А.Ю. Выемочная техника, задействованная на угольных разрезах в южной части Дальневосточного региона // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2013. №3 (30). С. 081-084.
6. Архипов Г.И. Основы недропользования. – Хабаровск : Издательство «РИОТИП», 2008. 356 с.
7. Чебан А.Ю. О целесообразности внедрения послойно-полосовых технологий при разработке месторождений цементного сырья в Дальневосточном регионе // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. №10. С. 53-58.
8. Васильева С.В., Секисов А.Г. Экономика отраслевых рынков. Изд-во. ЧитГУ, Чита, 2011. 124с.
9. Справочник. Открытые горные работы / К.Н. Трубецкой, М.Г. Потапов, К.Е. Виницкий, Н.Н. Мельников и др. – М.: Горное бюро, 1994. 590 с.
10. Архипов А.Б. Подводная добыча твердых полезных ископаемых: технологии и перспективы их развития // Проблемы недропользования. 2024. № 3 (42). С. 16-22.
11. Чебан А.Ю. Техническое оснащение предприятий по добыче нерудных строительных материалов в Хабаровском крае // Механизация строительства. 2017. №2. С. 23-26.
12. Архипова Ю.А. Экономическая оценка деятельности горнодобывающих предприятий цветной металлургии Дальнего Востока РФ // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № S.21. С. 374-388.

Comparative analysis of techniques used in open-pit mining

Arkhipov A.B.^{1,a}

¹ Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, MI FEB RAS, 51, Turgenev str., Khabarovsk, 680000, Russia

^a alekseyarhipov97@icloud.com,

Keywords: open-pit mining, dump truck, excavator.

Open-pit mining is often associated with large volumes of overburden, it increases the distance of its transportation, as a result it becomes economically more expensive to excavate minerals. The open-pit mining method is attractive for use due to its advantages: technological, technical, organizational, social and environmental in comparison with underground mining. The open-pit mining method has such advantages as: high labor productivity, lower production costs, resource saving, reduction of 2-3 times or more in the construction time of enterprises of similar capacity, reduction of the loss of minerals in the subsurface, comfortable and safe working conditions.

Various mining equipment is used in open-pit mining operations. However, under the conditions of sanctions restrictions there are problems in the supply of certain types of mining equipment: heavy-duty dump trucks, hydraulic excavators, tunneling and cleaning equipment of Western production, etc. In this regard, the article considers the possibility of using excavators and dump trucks of domestic production instead of imported ones used at the Malmyzhskoye gold-copper-porphyry deposit.

УДК 62-822

Поворотный ленточно-валковый рабочий орган бетоноотделочной машины.

Востоков Н.В.^{1,a} Кашуба В.Б.^{1,b}, Мамаев Л.А.¹, Кашуба В.В.¹

Братский Государственный Университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
vostokov12@mail.ru , kvb1964@yandex.ru

Ключевые слова: бетон, бетонные смеси, обработка, заглаживание, ленточно-валковые.

В данной статье рассматриваются способы обработки бетонных поверхностей с помощью рабочих органов бетоноотделочных машин. В статье рассматриваются бетоноотделочные машины, чей рабочий орган представляет из себя валок, брус и ленточно-валковый заглаживающий рабочий орган. Статья основывается на обработке незатвердевшей бетонной поверхности на промышленном поточном производстве. В статье рассматривается уже существующая классификация бетоноотделочных машин и расширяется новым видом рабочего органа – поворотным ленточно-валковым рабочим органом. В статье описывается принцип действия поворотного ленточно-валкового рабочего органа, приводятся его достоинства и недостатки в сравнении с неповоротным рабочим органом. В работе представлена схема поворотного ленточно-валкового рабочего органа. Создание нового поворотного механизма для бетоноотделочных машин позволит повысить качество готовых бетонных изделий на поточном производстве.

В современном строительстве существует два основных типа отделки бетонных поверхностей. Первый это обработка незатвердевшей бетонной смеси. Второй – обработка уже затвердевшей бетонной смеси.

Заглаживание незатвердевшей бетонной смеси может производиться с помощью заглаживающих машин. Они могут быть смонтированы на самоходных порталах, навешены на раму бетоноукладчика или формовочного агрегата, а также выполнены в виде ручных заглаживающих машин. Область применения таких машин зависит от состава бетонных смесей, требуемого качества обработки, производительности работ, а также от технологии производства на конкретном предприятии.

Так же для улучшения прочностных характеристик бетона, на бетонную смесь могут воздействовать магнитными и электрическими полями с помощью различных активаторов, а для улучшения укладки бетона используются виброагрегаты.

Качество итоговой бетонной поверхности зависит на прямую от множества факторов, таких как:

- Подобранная консистенция и состав смеси, в том числе применение специальных добавок.
- Применение определенных способов укладки бетонной смеси под тот или иной строительный проект.
- Обработка бетонной поверхности и дальнейший уход за ним.

Вступая в реакцию с водой, компоненты цемента образуют новые кристаллические соединения, обуславливающие прочность бетона, то есть, бетонный раствор не просто высыхает в опалубке, а преобразуется в новый материал — бетон.

Также в состав бетонной смеси включают мелкие и крупные заполнители. В качестве мелких заполнителей обычно выступает песок средних фракций (размер зерна до 3–5 мм), а в качестве крупных — гравий, щебень, гранитный отсев, мраморная крошка. Размер и состав заполнителей регламентируется технической документацией.

Заполнители, с одной стороны, структурируют бетон и повышают его прочность, с другой стороны, поскольку они намного дешевле чем цемент, снижают стоимость готового бетона.

На промышленном производстве готовых бетонных изделий применяются схожие методы укладки и обработки бетонных поверхностей.

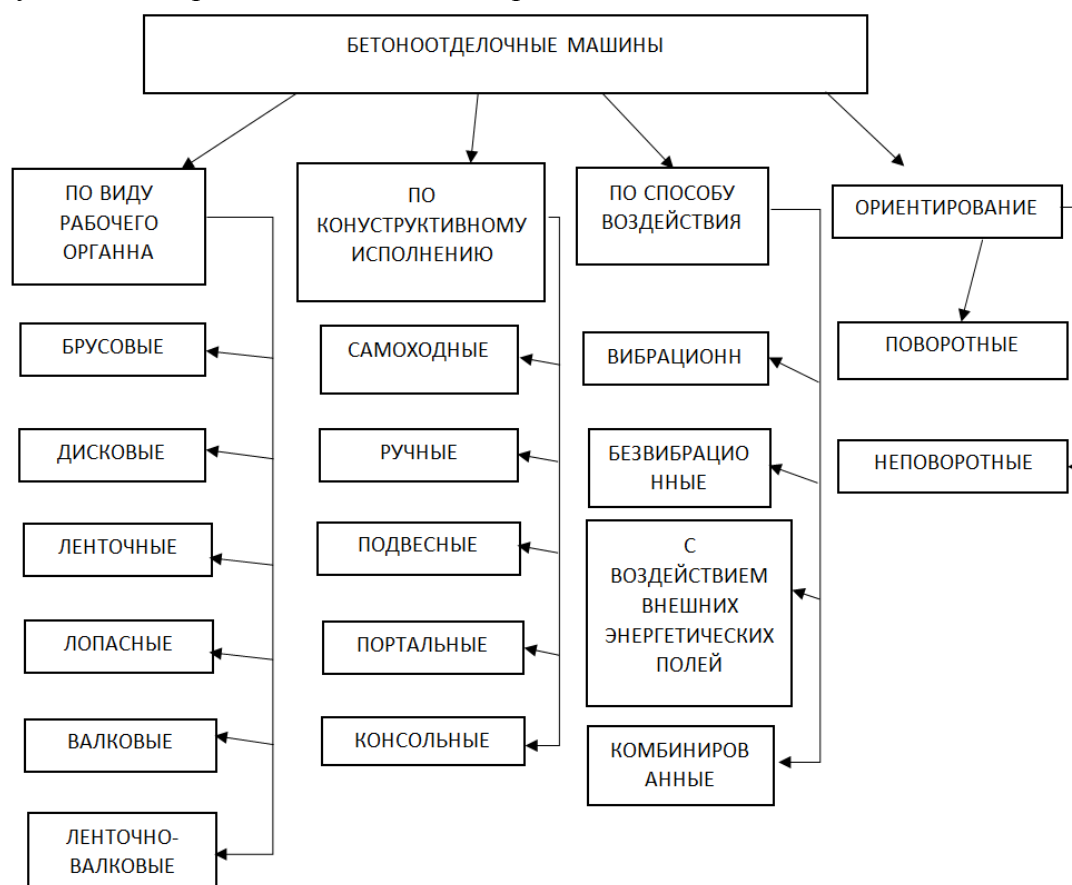


Рис.1. Классификация бетоноотделочных машин.

Существующая классификация представленная на рисунке 1 расширяется новым видом рабочего органа, а именно поворотным ленточно-валковым рабочим органом, для чего

в классификацию включается ориентирование, обозначающее положение рабочего органа относительно бетонной смеси.

Поворотные бетоноотделочные машины в свою очередь можно разделить на два типа:

- 1) Полноповоротные – способные разворачивать рабочий орган на 360° .
- 2) Полуповоротные – ограниченного вращения. Угол задается конструктивными особенностями машины или потребностью производства и не может превышать 360°

Поворот ленточно-валковой бетоноотделочной машины позволят увеличить пятно контакта рабочей поверхности бетоноотделочной машины и бетонной смеси рис 2.

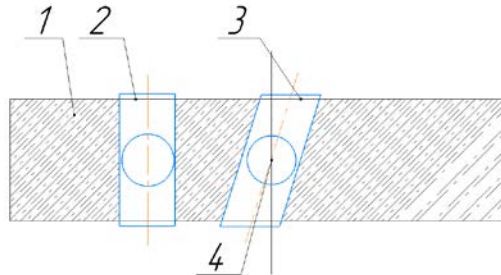


Рис.2. Схема валкового поворотного органа бетоноотделочной машины.

- 1- незатвердевшая бетонная смесь, 2 – поворотный рабочий орган бетоноотделочной машины в изначальном положении 3 – поворотный орган бетоноотделочной машины в рабочем положении 4 – поворотный механизм

Чем выше пятно контакта заглаживающей поверхности и бетонной смеси, тем выше качество готовой бетонной поверхности или изделия (рис2.). Заглаживание позволяет выравнить незатвердевшую поверхность выгнав мелкую фракцию бетонной смеси на поверхность, а более крупные включения, наоборот, углубить под поверхность. Выравнивание так же позволяет заполнить пустоты, образовавшиеся при заливке бетона.

Для лучшей усадки бетона и заполнения полостей рекомендуется использовать специальные виброагрегаты. Под воздействием вибрации из бетонной смеси выгоняется воздух, а как следствие заполняются пустоты, делая бетонную поверхность монолитной и намного более прочной, что так же в лучшую сторону отражается на качестве готового изделия.

Рабочим органом ленточно-валковой машины являются валки (1) они заглаживают незатвердевшую бетонную поверхность (3). Не смотря на преимущества данной конструкции есть и недостатки, а именно сложность конструкции в сравнении с неповоротным рабочим органом и как следствие более высокая цена за разработку и производство.

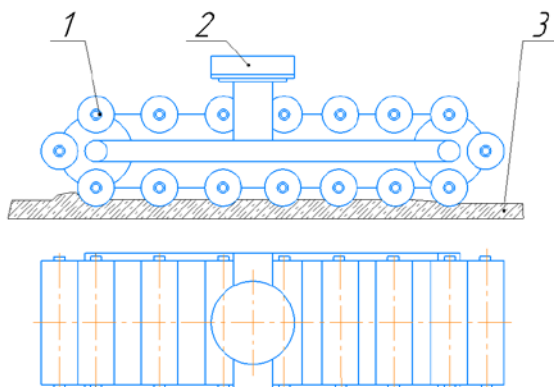


Рис.3. Схема ленточно-валковой поворотной бетоноотделочной машины

- где 1 – рабочий орган ленточно-валковой бетоноотделочной машины, 2- поворотный орган, 3 – незатвердевшая бетонная поверхность.

Таким образом, обработка бетонных поверхностей, будь то уже затвердевшая бетонная поверхность или не затвердевшая требует особого технического подхода в зависимости от обстоятельств укладки бетонной смеси. Таким образом на промышленных производствах готовых бетонных изделий используются специальные затирочные агрегаты, такие как дисковые, брусковые, ленточные, валковые и ленточно-валковые машины. Ленточно-валковые агрегаты используются для обработки не затвердевших бетонных поверхностей, они позволяют качественно обработать поверхность изделия. Так же в статье приведена классификация бетоноотделочных машин и рассмотрена концепция модернизации ленточно-валковой затирочной машины, а именно её оснащение поворотным кругом для увеличения пятна контакта валков с бетонной смеси.

Литература:

1. А.В. Болотный – Теория и процессы заглаживания бетонных смесей. Ленинград 1974г.
2. Патент RU2022116513А от 17.06.2022 Авторы: Леонид Алексеевич Мамаев; Владимир Богданович Кашуба; Сергей Николаевич Герасимов; Юсуфджон Косимович Юсуфов; Вячеслав Сергеевич Фёдоров; Владимир Владимирович Кашуба
3. Сайт Iskra, опорно-поворотные круги ссылка на сайт: https://iskra-rus.ru/articles/oporno_povorotnye_ustroystva_osobennosti_konstruktsii_vidy_oblast_primeneniya (26.03.2025)
4. Сайт Beton, обработка бетонных поверхностей ссылка на сайт: <https://beton-house.com/obrabotka/obrabotka-betonnyh-poverhnostej-1083> (26.03.2025)
5. Сайт sciencedirect ссылка на сайт <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780080441009500863> (31.03.25)
6. Патент RU2016121483А, валковый вибрационный рабочий орган.
7. Сайт smsm.ru ссылка на сайт: <https://www.smsm.ru/articles/stroitelnyy-vibrator-naznachenie-kharakteristiki-raznovidnosti> (31.03.2025)

Rotary belt-roller working body of a concrete-finishing machine.

Vostokov N.V.^{1, a}, Kashuba V.B.^{1, b}, Mamaev L.A.¹, Kashuba V. V.¹

Bratsk State University, 40 Makarenko str., Bratsk, Russia

^avostokov12@mail.ru, ^bkvb1964@yandex.ru

Keywords: concrete, concrete mixes, processing, smoothing, belt-rolling.

This article discusses the methods of processing concrete surfaces using the working bodies of concrete-finishing machines. The article discusses concrete-finishing machines, whose working body consists of a roll, a beam and a belt-roller smoothing working body. The article is based on the processing of an uncured concrete surface in an industrial production line. The article examines the existing classification of concrete-forming machines and expands it with a new type of working body - a rotary belt-roller working body. The article describes the principle of operation of a rotary belt-roller working body, and provides its advantages and disadvantages in comparison with a non-rotating working body. The paper presents a diagram of a rotary belt-roller working body. The creation of a new rotary mechanism for concrete-forming machines will improve the quality of finished concrete products in in-line production.

УДК 629.3.01

Определение параметров поворотного рабочего оборудования экскаватора

Запутляев К.Н.^{1,a}, Боярский А.В.^{1,b}, Погонина А.М.^{1,c}

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет(МАДИ), 125319, Ленинградский проспект, д.64, Москва, Россия

^a ZaputlyaevK@mail.ru, ^b boyarskiy-2001@mail.ru, ^c shur-shu@mail.ru

Ключевые слова: поворотная рукоять, поворотный ковш, экскаватор с поворотным рабочим оборудованием

Работа посвящена исследованию процесса работы поворотной рукоятью экскаватора. Авторами предложена новая конструкция для увеличения производительности землеройных работ в ограниченных условиях. В ходе исследования определен оптимальный угол наклона, который позволяет сохранять наполняемость и не рассыпать материал при перемещении из выемки в насыпь. Так же для автоматизации процесса исследования и дальнейшей работы была написана программное обеспечение, способное автоматизировано рассчитывать разницу в процентном содержании между эталонными и экспериментальными значениями угла поворота, а также массы грунта для наполнения ковша.

В условиях интенсивного строительства, осуществляемого в пределах городской застройки или в холмистой местности, существуют ситуации, когда для проведения земляных работ не хватает пространства для свободного маневра экскаватора. Одним из решений данной проблемы может является разработка нового вида рукояти стрелы, позволяющего осуществлять маневрирования экскаватора в ограниченном пространстве. При разработке стрелы экскаватора необходимо учитывать так же особые технические требования и характеристики данного оборудования такие как требования по статике и экономичности [1,2].

Актуальность данной научной работы состоит в том, что разрабатываемая конструкция будет востребована при строительных работах в ограниченных пространствах: выкапывания траншей, создания откосов. Благодаря своей маневренности, конструкция позволит добиться высокого качества и точности работ. В ходе научной работы по разработке новой рукояти стрелы экскаватора будут получены результаты ее испытания для определения прочности, стоимости, рентабельности при эксплуатации в сравнении с аналогичными экскаваторами с неповоротной стрелой [3].

Для проведения лабораторных испытаний с целью определения оптимального угла наклона рукояти с ковшом была создана рабочая модель. Она состоит из основной пластины с угловыми размерами, поворотного механизма рукояти, рукоятью, ковша типа обратная лопата, гидроцилиндров подъема и опускания рукояти и ковша (рис.1).

В ходе проведения исследовательской работы было выполнено 4 серии экспериментов по 6 измерений с изменением угла поворота рукояти стрелы от 0 до 50 градусов с шагом 10 градусов. Поворот ковша фиксировался, определялись положение в пространстве, вес грунта, рассчитывался коэффициент наполняемости.

Исследования проводились в лаборатории с грунтовым каналом, использовались 2 типа грунтов – супесь и суглинок



Рис 1. Макет рабочего оборудования

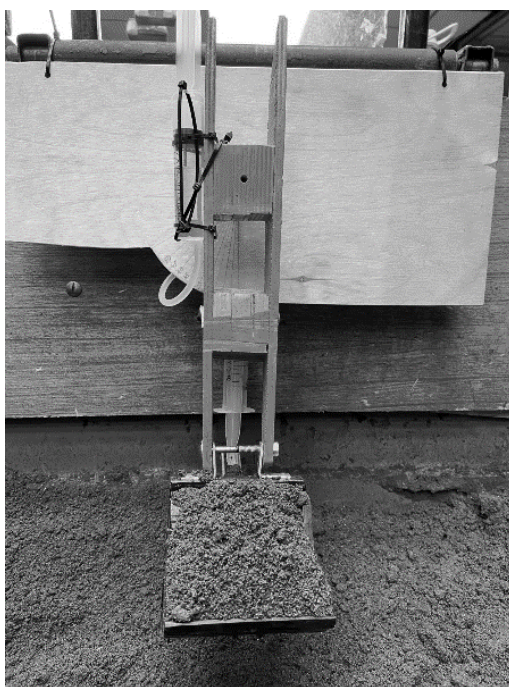


Рис 2. Эталонное положение ковша

Для рабочего оборудования определено эталонное положения (рис.2), когда степень наполняемости ковша равно 1, и расчетные положения (рис.3), когда угол и степень наполняемости ковша определяется экспериментальным путем.

Для удобства и наглядности был введён коэффициент наполняемости k , который характеризует степень наполненности ковша:

$$k = \frac{m}{M_э} \quad (1)$$

где k – коэффициент; m - масса грунта в ковше при заданном градусе, гр; $M_э$ - эталонное значение, обозначающее массу грунта в наполненном ковше, гр.

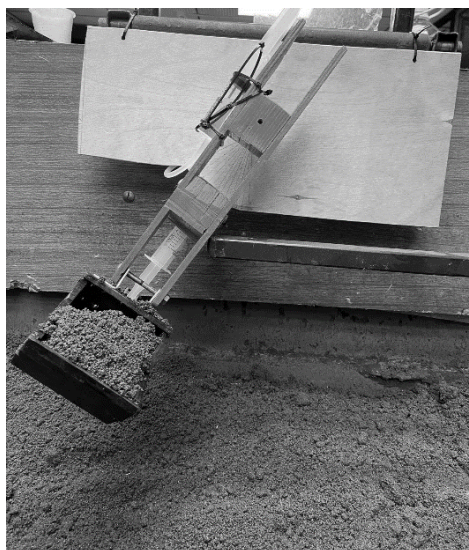


Рис 3. Поворотное положение ковша

Полученные результаты заносятся в отчетную таблицу №1.

Таблица 1

Значения, полученные в ходе исследования

Угол поворота, градусы.	0	10	20	30	40	50
Объем набранного грунта, гр.	654,5	593,0	534,7	448,5	438,2	289,0

Далее после анализа результатов строится график зависимости потери грунта от угла наклона ковша.

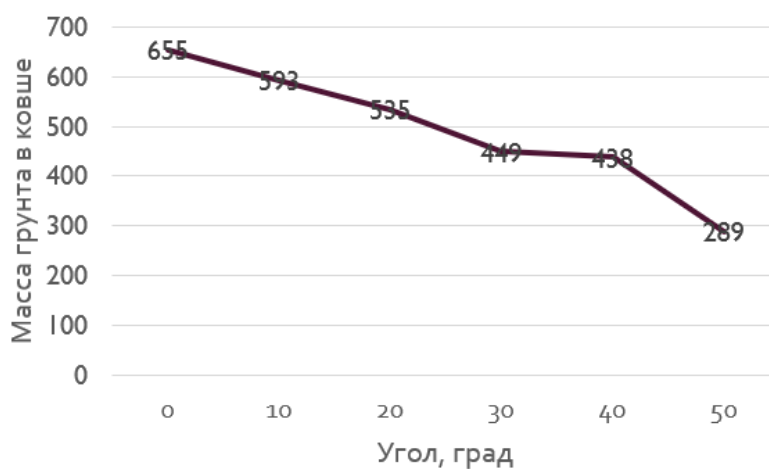


Рис 5. График изменения угла поворота и массы грунта в ковше

Анализируя полученный график, определяем оптимальное положение ковша исходя из коэффициента наполняемости (табл.2)

Таблица 2

Значение коэффициента наполняемости.

Угол наклона ковша, гр.	0	10	20	30	40	50
Коэффициент наполняемости	1	0,9	0,84	0,75	0,73	0,4

Допустимые потери фиксируются при угле наклона до 40 градусов, дальше идут значительные потери грунта, и эффективность работы экскаваторного оборудования, оцениваемая по количеству переносимого материала, снижается в более чем 2 раза.

После получения данных была написана программа для расчета изменения значения угла наклона и наполнения ковша относительно эталонных значений. Программа позволяет в автоматическом режиме рассчитывать коэффициент наполнения ковша и использовать его оптимальное значение при работе с разными типами грунтов.

В ходе работы над проектом была разработана программа для расчета изменения значения угла наклона и наполнения ковша относительно эталонных значений. Благодаря написанной программе и спроектированному стенду можно определить оптимальный угол поворота рукояти наполнения ковша.

В процессе вычисления значений наполнения ковша и углов поворота рукояти было выявлено, что оптимальным углом поворота является угол, равный 40-ка градусам. При данном угле поворота рукояти достигаются наименьшие допустимые потери грунта.

Данное техническое решение поворотной рукояти позволит увеличить на 32 % производительность экскаватора при работе в стесненных условиях.

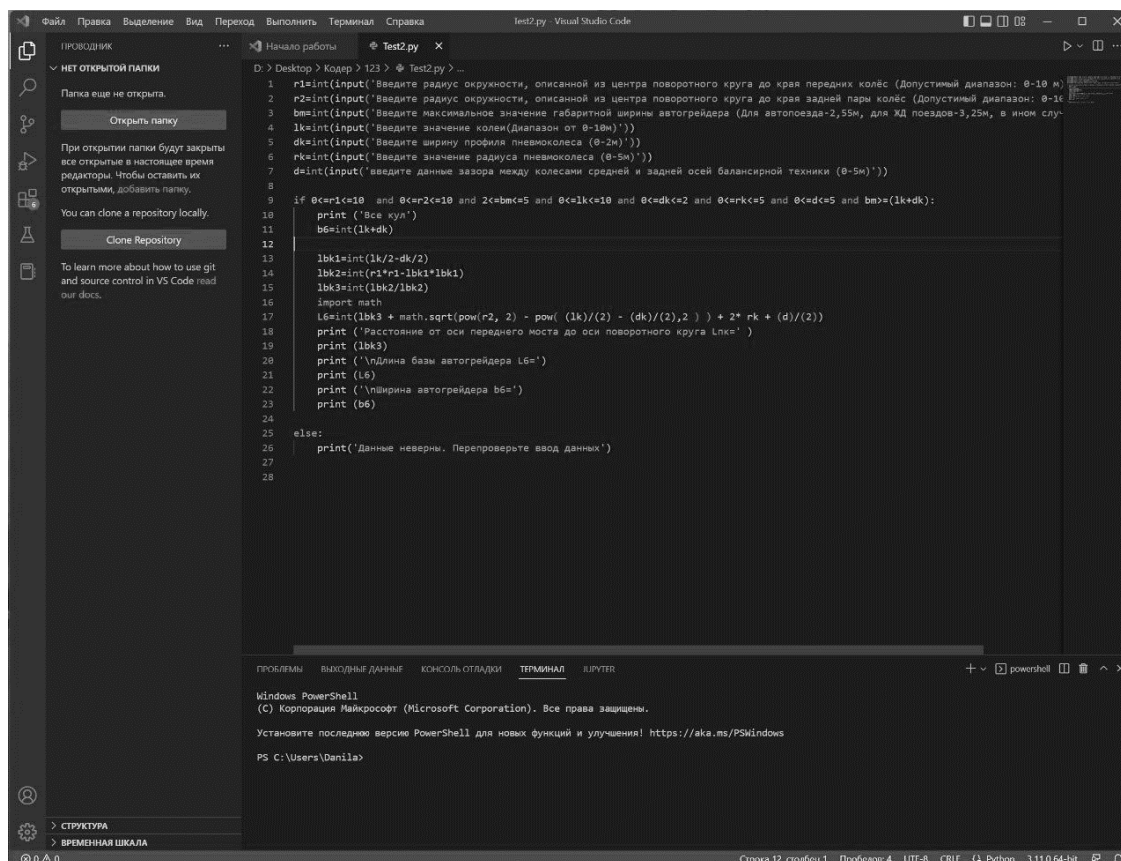


Рис 6. Экран программы

Направления для дальнейших исследований:

- исследования работы поворотной рукояти в зависимости от разных типов грунта, определение оптимального угла и коэффициента наполнения;
- разработка поворотного механизма, для регулировки угла поворота рукояти;
- разработка автоматизированной системы контроля угла наклона ковша.

Литература:

1. Епифанов, В. Н. Гидравлический привод строительных и дорожных машин : учебное пособие / В. Н. Епифанов, С. Л. Васильевых. — Киров : ВятГУ, 2017. — 65 с.
2. Кузнецов, В. В. Машины для земляных работ: учебно-методическое пособие / В. В. Кузнецов. — Брянск : Брянский ГАУ, 2019. — 443 с.
3. Машиностроение. Энциклопедия. Машиностроение. Горные машины : энциклопедия / Ю. А. Лагунова, А. П. Комиссаров, В. С. Шестаков, С. В. Белов. — Москва : Машиностроение, [б. г.]. — Том IV-24 — 2011. — 496 с.
4. Озорнин, С. П. Дорожно-строительные машины: история создания, развития, эксплуатации и технического сервиса : учебное пособие / С. П. Озорнин. — Чита : ЗабГУ, 2021. — 284 с.
5. Чмиль, В. П. Гидропневмопривод строительной техники. Конструкция, принцип действия, расчет : учебное пособие / В. П. Чмиль. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 320 с.

Development of rotary excavator working equipment

Boyarskiy A.V.^{1,a}, Zaputlyayev K.N.^{1,b}, Pogonina A.M.^{1,c}

¹Moscow Automobile and Road State University, 64, Leningradskii prospect, Moscow, 125319, Russia

^a konstantin.zaputlyayev@mail.ru, ^b BoyarskiiArs@yandex.ru, ^c shur-shu@mail.ru

Keywords: rotary handle, rotary bucket, excavator with rotary working equipment

The work is devoted to the study of the operation of the rotary handle of an excavator. The authors proposed a new design to increase the productivity of earthmoving operations in limited conditions. During the study, the optimal angle of inclination was determined, which allows to maintain the filling capacity and not to scatter the material when moving from the recess to the embankment. Also, to automate the research process and further work, software was written that can automatically calculate the percentage difference between the reference and experimental values of the rotation angle, as well as the mass of soil for filling the bucket.

УДК 691.3:621.9.04:620.98

**Магнитная активация бетона и её роль в 3D-печати
строительных конструкций**

Федоров В.С.^{1,a}, Нестер А.С.^{1,b}, Портнягина А.В.^{1,c}

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^afedorov-v-s@yandex.ru; ^bzombine2012@yandex.ru; ^cportnyagina_1408@mail.ru

Ключевые слова: Магнитная активация бетона, 3D-печать строительных конструкций, Межслойная адгезия, Ориентация микроармирующих волокон, Умные бетоны

Статья исследует методы магнитной активации бетона для 3D-печати: магнитную обработку воды, воздействие полей при смешивании и экструзии, внедрение магнитных наночастиц (Fe_3O_4). Эти технологии повышают прочность (до 30%), ускоряют гидратацию, улучшают адгезию слоёв и снижают пористость, что критично для аддитивного производства. Магнитные поля ориентируют волокна и частицы, уменьшая анизотропию и дефекты. Отмечены сложности: интеграция оборудования, оптимизация параметров, совместимость с химическими добавками. Перспективы включают «умные» бетоны с адаптивными свойствами и ИИ-управление процессами. Метод открывает путь к созданию высокопрочных, точных конструкций, а его развитие требует стандартизации и цифровых решений для строительной 3D-печати.

Современные технологии 3D-печати в строительстве сталкиваются с рядом вызовов, связанных с необходимостью обеспечения высокой прочности, адгезии слоёв и устойчивости бетонных конструкций к деформациям. Одним из инновационных подходов, способных решить эти задачи, является магнитная активация бетона — комплекс методов, направленных на модификацию структуры и свойств бетонных смесей с использованием магнитных полей или магнитных материалов. Эти технологии не только улучшают физико-механические характеристики бетона, но и открывают новые возможности для оптимизации процессов аддитивного производства [3].

Одним из ключевых методов является магнитная обработка воды, применяемой в составе бетонной смеси. При пропускании воды через магнитное поле разрушаются крупные молекулярные кластеры, что повышает её реакционную способность [1]. Это приводит к улучшению смачивания цементных частиц, ускорению гидратации и формированию более плотной микроструктуры (рис.1). В результате прочность бетона на ранних стадиях отверждения увеличивается на 15–20%, что критично для 3D-печати, где каждый новый слой должен быстро набирать прочность, чтобы выдерживать нагрузку от последующих слоёв [1]. Кроме того, магнитная вода позволяет снизить её расход на 5–10% без потери удобоукладываемости, что повышает экономическую эффективность процесса.

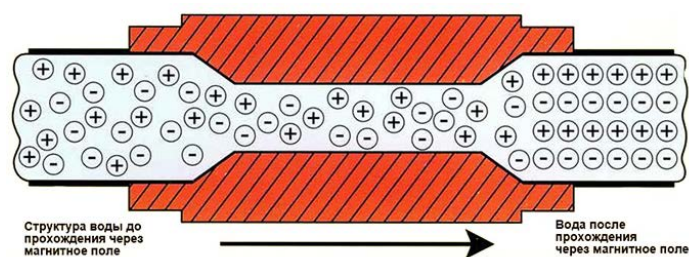


Рис. 1. Схема магнитной обработки воды: поток воды проходит через магнитное поле.

Ещё одним перспективным направлением является воздействие магнитного поля на этапе смешивания компонентов. Магнитное поле ориентирует частицы заполнителей, цемента и микроармирующих волокон (стальных, базальтовых) вдоль заданного направления, снижая анизотропию механических свойств [3]. Для 3D-печати, где слоистая структура часто становится слабым звеном, это особенно важно: выравнивание волокон и частиц минимизирует расслоение и повышает прочность на растяжение и изгиб на 10–30% [3]. Например, стальные волокна, расположенные параллельно направлению печати, эффективно распределяют напряжения, предотвращая образование трещин.

Значительный потенциал демонстрирует введение магнитных наноматериалов, таких как наночастицы оксида железа (Fe_3O_4) [2]. Эти частицы выполняют двойную функцию: во-первых, они выступают центрами кристаллизации, уплотняя структуру бетона и снижая его

пористость на 5–10%, что повышает устойчивость к коррозии и циклам замораживания-оттаивания [2]. Во-вторых, под действием внешнего магнитного поля наночастицы могут перераспределяться в объёме смеси, локально усиливая её свойства в зонах повышенных нагрузок. Это открывает путь к созданию «умных» бетонов, адаптирующихся к условиям эксплуатации [4].

Отдельного внимания заслуживает применение магнитного поля в момент экструзии рисунок 2. бетона через сопло 3D-принтера. На этом этапе магнитное воздействие выравнивает частицы вдоль направления печати, усиливая сцепление между слоями [3]. Это особенно важно для минимизации дефектов на границах слоёв, которые традиционно являются слабыми местами в аддитивно изготовленных конструкциях. Кроме того, управляемая ориентация частиц позволяет снизить риск деформаций при высыхании и усадке, повышая геометрическую точность печати.

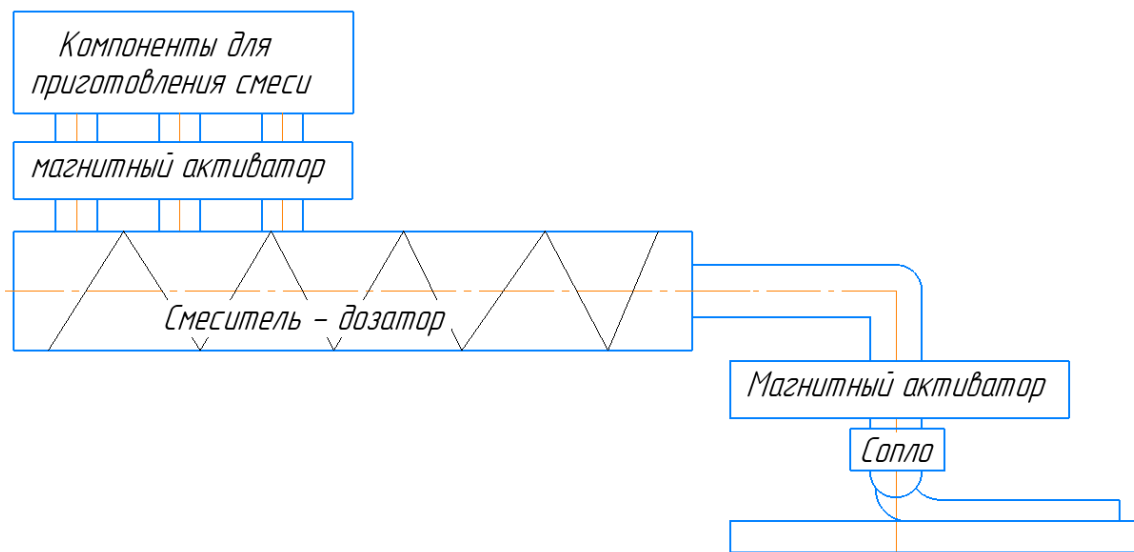


Рис. 2. Схематичное изображение строительного 3D-принтера с магнитными активаторами

Несмотря на преимущества, внедрение магнитной активации в 3D-печать сопряжено с техническими и экономическими сложностями. Интеграция магнитных систем (катушек, генераторов) в строительные принтеры увеличивает стоимость оборудования и требует дополнительных энергозатрат [3]. Кроме того, необходимо тщательно подбирать параметры магнитного поля — его силу, частоту и время воздействия — для каждого конкретного состава бетона. Например, избыточная интенсивность поля может привести к агрегации наночастиц, ухудшая однородность смеси, а слишком слабое воздействие не даст желаемого эффекта [2]. Ещё одной проблемой является совместимость магнитных методов с химическими добавками, такими как пластификаторы или замедлители схватывания. В некоторых случаях магнитная обработка может нейтрализовать действие этих модификаторов, что требует комплексного подхода к проектированию рецептур [4].

Однако перспективы технологии остаются впечатляющими. Одним из ключевых направлений будущих исследований является разработка адаптивных бетонов с магнитными наночастицами, способными изменять свои свойства в реальном времени под воздействием внешних полей [4]. Например, такие материалы могли бы упрочняться в зонах механических напряжений или восстанавливать микротрещины за счёт переориентации частиц. Другим многообещающим направлением является интеграция систем искусственного интеллекта для динамического управления параметрами магнитного поля в процессе печати [5]. Алгоритмы машинного обучения могли бы анализировать данные с датчиков (температура, вязкость,

скорость экструзии) и корректировать магнитное воздействие, оптимизируя структуру каждого слоя [5].

Магнитная активация бетона представляет собой революционный инструмент для 3D-печати в строительстве, предлагая решения для повышения прочности, долговечности и точности конструкций. Ускорение гидратации, улучшение межслойной адгезии и снижение пористости — эти достижения уже сегодня демонстрируют практическую значимость метода [1–3]. Однако для массового внедрения требуется преодолеть технологические барьеры, связанные с стоимостью оборудования и сложностью управления процессами. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на стандартизации методов, разработке универсальных магнитных добавок и создании цифровых платформ для управления печатью [4–5]. В перспективе сочетание магнитной активации с другими инновационными технологиями, такими как самовосстанавливающиеся материалы или углеродные нанотрубки, может привести к созданию нового поколения строительных материалов, превосходящих традиционные аналоги по всем ключевым параметрам.

Литература:

1. Němeček, J., & Šmilauer, V. (2020). *Magnetic field effects on cement hydration: A review*. Construction and Building Materials, 256, 119457. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119457
2. Li, Z., Wang, H., & He, X. (2021). *Fe₃O₄ nanoparticles in cement composites: Mechanical enhancement and microstructure analysis*. Cement and Concrete Composites, 122, 104141. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104141
3. Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., & Salet, T. (2016). *Additive manufacturing of concrete in construction: Challenges and opportunities*. Automation in Construction, 72, 3-13. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.05.005
4. Han, Y., Yang, Z., Ding, T., & Xiao, J. (2022). *Smart materials in 3D concrete printing: A focus on magnetic responsiveness*. Materials & Design, 214, 110385. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110385
5. Zhang, J., & Khoshnevis, B. (2019). *AI-driven optimization of additive manufacturing processes for construction*. Journal of Building Engineering, 25, 100798. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.100798

Magnetic activation of concrete and its role in 3D printing of building structures

Fedorov V.S.^{1,a}, Nester A.S.^{1,b}, Portnyagina A.V.^{1,c}.

¹Bratsk State University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia

^afedorov-v-s@yandex.ru; ^bzombine2012@yandex.ru; ^cportnyagina_1408@mail.ru

Keywords: magnetic activation of concrete, 3d printing of building structures, interlayer adhesion, orientation of micro-reinforcing fibers, smart concretes

The article explores methods of magnetic activation of concrete for 3D printing: magnetic water treatment, the effects of fields during mixing and extrusion, and the introduction of magnetic nanoparticles (Fe₃O₄). These technologies increase strength (up to 30%), accelerate hydration, improve layer adhesion and reduce porosity, which is critical for additive manufacturing. Magnetic fields orient fibers and particles, reducing anisotropy and defects. Difficulties were noted: integration of equipment, optimization of parameters, compatibility with chemical additives. Prospects include smart concretes with adaptive properties and AI process control. The method opens the way to creating a high-quality

УДК 691.3:621.9.04:620.98

Аддитивные технологии в строительстве, тенденции развития и прогнозирование роста рынка 3D-печати

Федоров В.С.^{1,a}, Нестер А.С.^{1,b}

¹ Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^a Fedorov-v-s@yandex.ru, ^b zombine2012@yandex.ru

Ключевые слова: 3D-печать в строительных конструкциях, создание жилых домов, 3D-модель, экологически устойчивые здания, газобетон, сокращение расходов.

Статья анализирует применение 3D-печати в строительстве, акцентируя внимание на технологиях FDM и SLS. Приведены примеры ускоренного возведения объектов (дом площадью 177 м² за 48 часов компанией S-Squader), сокращения затрат на рабочую силу (до 25%) и использования экоматериалов. Рынок 3D-печатных стройматериалов вырастет с 13,5 млн. от 2020 до 40 млн. к 2030 году. Преимущества включают гибкость дизайна и снижение логистических расходов, а ключевые вызовы — высокую стоимость оборудования и температурные ограничения. Несмотря на технологические и нормативные барьеры, технология способна повысить доступность жилья и снизить экологическое воздействие, особенно при поддержке государственных инициатив.

3D-печать (трехмерная печать) — это процесс создания трехмерных физических объектов из цифровых трехмерных моделей. В процессе 3D-печати материал (как правило, пластик, металл, смола и другие) наслаивается слой за слоем, с использованием трехмерных данных модели, для создания конечного объекта. Этот процесс также называется аддитивным производством, потому что он добавляет материал для создания объекта, в отличие от вырезки или литья, которые удаляют материал из начального блока.

3D-печать началась в 1980-х годах, когда инженеры из компании 3D Systems разработали процесс, позволяющий создавать трехмерные объекты из смолы с использованием лазеров. Это стало началом коммерческого развития 3D-печати.

С течением времени разработано много различных технологий 3D-печати, включая Fused Deposition Modeling (FDM) и Selective Laser Sintering (SLS) [1].

3D-печать быстро расширилась в различные отрасли, включая медицину, авиацию, автомобильное производство и другие. Это быстро развивающаяся область, которая включает в себя различные методы, такие как стереолитография, лазерная стереоформовка, моделирование плавлением, и селективное лазерное спекание.



Рис. 1. Пример печати на 3D принтере

Процесс 3D-печати начинается с загрузки 3D-модели в принтер, который затем создает объект, наслаивая материал слой за слоем в соответствии с инструкциями из модели. После завершения печати объект может быть извлечен из принтера и дополнительно обработан или использован в различных областях, включая производство, медицину, архитектуру, дизайн и другие. 3D-печать предоставляет возможность создавать сложные и индивидуальные объекты, что делает ее весьма популярной в различных сферах.

Каждый год рынок 3D-печати продолжает демонстрировать впечатляющий рост, достигая значительных объемов и охватывая все больше сфер применения. По данным исследования Grand View Research в 2020 году было продано около 3.8 млн 3D-принтеров, а к 2025 эта цифра достигла 26 млн. принтеров.

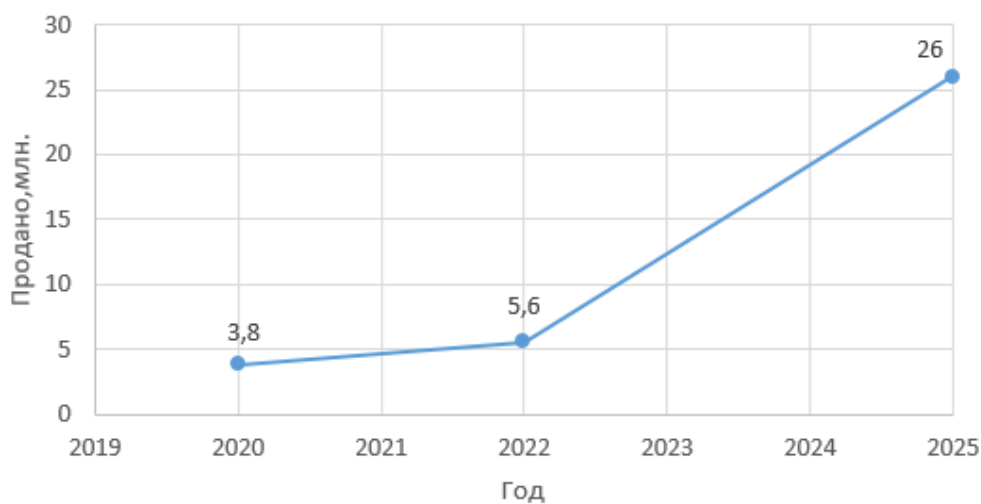


Рис. 2. Рост продаж 3D-принтеров

Применение 3D-печати в строительстве предоставляет множество преимуществ и возможностей. Вот несколько основных областей, в которых 3D-печать нашла применение в строительстве:

- **Создание жилых домов:** С помощью 3D-печати возможно строить жилые дома, включая одноэтажные и многоквартирные здания. Это позволяет сократить сроки строительства и затраты на рабочую силу, а также может увеличить доступность доступного жилья.
- **Строительство экологически устойчивых зданий:** 3D-печать позволяет использовать разнообразные экологически дружелюбные материалы, что способствует созданию экологически устойчивых зданий с улучшенной энергоэффективностью.
- **Производство прототипов и моделей:** 3D-печать позволяет создавать прототипы и модели будущих строительных проектов с высокой точностью и быстро. Это полезно для дизайнеров и архитекторов при разработке проектов.
- **Изготовление строительных элементов и деталей:** 3D-печать используется для создания строительных элементов, деталей и украшений, что увеличивает индивидуальность и дизайн зданий.
- **Реставрация и восстановление исторических объектов:** 3D-печать может быть использована для реставрации и восстановления исторических объектов и памятников архитектуры.
- **Построение временных или чрезвычайных жилищ:** 3D-печать позволяет быстро создавать временные жилища в условиях чрезвычайных ситуаций, таких как природные катастрофы или беженческие кризисы.

- Исследования и инновации: 3D-печать в строительстве также стимулирует исследования и инновации, что может привести к разработке новых материалов и методов, улучшающих процессы строительства. [2].

Применение 3D-печати в строительстве помогает повысить эффективность, снизить затраты и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду, что делает эту технологию все более востребованной в строительной отрасли.

По данным компании MarketsandMarkets рынок 3D-печатных строительных материалов в 2020 году оценивался в 13,5 млн. , а по прогнозам к 2030 году рынок возрастет до 40 млн.

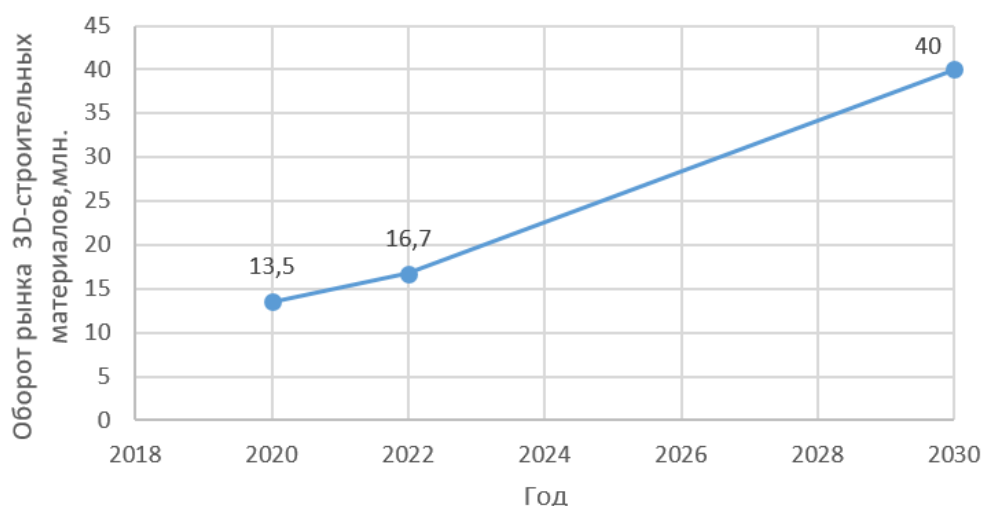


Рис. 3. Рост рынка строительных материалов

Благодаря совместным усилиям государства, предприятий, 3D-печать в России имеет потенциал стать важной составляющей инновационной экосистемы, способствующей экономическому развитию и устойчивости страны.

3D-печать в строительстве обещает значительное улучшение процессов и результатов в этой отрасли. С ее помощью можно сократить сроки строительства, снизить затраты и оказать позитивное воздействие на окружающую среду [3].

Процесс 3D-печати позволяет создавать сложные дизайны, сокращать зависимость от рабочей силы и эффективно использовать стройматериалы. Экологическая сторона также становится все более важной.

Россия активно развивает 3D-печать в строительстве, что создает новые перспективы и возможности для улучшения этой отрасли. Эта технология будет продолжать привлекать внимание и стимулировать инновации в будущем.

Время возведения объекта строительства. Американская компания, занимающаяся разработками 3D принтеров, «S-Squader» (SQ3D), с помощью своей технологии напечатала жилой дом, площадью 177 кв. метров за 48 часов непрерывной работы, при этом, на подготовку данного проекта ушло 6 дней. Если из подобных условий убрать возможность печати и поставить обычных рабочих с классическими методами постройки, то только на возведение фундамента уйдет 25–30 дней, а на возведение стен (допустим, из самого простого материала – газобетона) около 7 дней. Такие возможности в разы сокращают расходы на заработную плату рабочих [4].

На примере дома, который был построен за 48 часов, компанией «S-Squader», мы можем видеть, что, при отлаженном процессе работы, в строительстве может быть задействовано бригада из рабочих до 3-х человек. При таких же вводных, но по классическому методу строительства, бригада сможет возвести подобное здание минимум через месяц работы.

Высокая стоимость оборудования, компенсируется скоростью возведения объектов и быстрой окупаемостью оборудования.

Необходимо учитывать температуру окружающей среды при использовании таких принтеров. У каждого существует свой температурный режим, как и у строительной смеси, поэтому, для того чтобы производить строительство объекта в низких температурах, необходимо сооружать так называемый «тепляк», то есть, отапливаемое помещение, размером с объект будущего строительства. Данные условия неблагоприятно сказываются на себестоимости будущего проекта. В условиях продолжительных зим или же постоянно холодного климата, себестоимость строительства будет выше, чем при работе в теплых регионах.

Строительство при помощи 3D принтера это достаточно новое направление в данной области, но имеет огромные перспективы. При помощи такой технологии можно сократить использование рабочей силы, сократить логистические нагрузки, сократить строительные расходы на 20–25%, а расходы на строительные материалы на 25–30%, благодаря возможности использовать переработанные материалы».

Использование технологии 3D-печати позволит уменьшить трудоемкость производства на строительных предприятиях, увеличить точность исполнения проектов и моделирования жилищных комплексов. При этом эта методика позволит значительно сократить временные и интеллектуальные затраты на создание моделей и проектов различных строительных объектов» [4].

Таким образом, внедрение 3D печати в строительство обещает существенное снижение себестоимости, такой способ будет способствовать повышению доступности жилья и улучшению качества строительства. Но есть и свои особенности: необходимо учесть и возможные сложности, связанные с технологическими и нормативными вопросами. Несмотря на это, перспективы в снижении издержек, путем внедрения 3D печати, будет развиваться и давать новые возможности снижения себестоимости еще не один десяток лет.

Литература:

1. Рынок технологий 3D-печати в России и мире: перспективы внедрения аддитивных технологий в производство [электронный ресурс]/URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/rynok-technologii-3d-pecati-v-rossii-i-mire-perspektivy-vnedreniya-additivnykh-technologiiivproizvodstvo> (дата обращения: 20.03.25)
2. Белов, В. Л., и Силонов, В. М. (2020). Технологии 3D-печати в строительстве: современное состояние и перспективы. Строительные материалы, 5, 27-29.
3. Additive Manufacturing in Construction: A Review of the State-of-the-Art and Challenges. Статья в Journal of Construction Engineering and Management (2020).
4. 3D-печать в промышленности и строительстве: актуальные тенденции и перспективы в России. Статья в журнале Промышленность и строительство (2020).

Additive technologies in construction, development trends and forecasting of the 3D printing market growth

Fedorov V.S.^{1,a}, Nester A.S.^{1,b},

¹ Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, Russian Federation

^a fedorov-v-s@yandex.ru; ^b zombine2012@yandex.ru

Keywords: 3D printing in building structures, creation of residential buildings, 3D model, environmentally sustainable buildings, aerated concrete, cost reduction.

The article analyzes the use of 3D printing in construction, focusing on FDM and SLS technologies. Examples of accelerated construction of facilities (a 177 m² house in 48 hours by S-Squader), reduction of labor costs (up to 25%) and the use of eco-materials are given. The 3D-printed building materials market will grow from 13.5 million by 2020 to 40 million by 2030. Advantages include design flexibility and reduced logistical costs, while key challenges include high equipment costs and temperature restrictions. Despite technological and regulatory barriers, technology has the potential to increase housing affordability and reduce environmental impacts, especially with the support of government initiatives.

УДК 621.644

Бестраншейные технологии укладки подземных коммуникаций: эволюция методов и бионические инновации

Федоров В.С.^{1,a}, Пугачёв А.А.^{1,b}, Герасимов С.Н.^{1,c}

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^afedorov-v-s@yandex.ru, ^bpaa.stroystandart@yandex.ru, ^csdm_gerasimov@rambler.ru

Ключевые слова: Бестраншейные технологии, подземные коммуникации, горизонтальное бурение, прокол, продавливание, бионика, гидропробойники

Статья посвящена эволюции методов укладки подземных инженерных коммуникаций, переходу от традиционных траншейных технологий к современным бестраншейным решениям. Рассмотрены ключевые методы, включая прокол, продавливание, горизонтальное бурение и щитовой способ, а также их преимущества: сокращение земляных работ, сохранение ландшафта и возможность работы в сложных грунтах. Особое внимание уделено техническим средствам — грунтотпрокалывающим установкам, пневмо- и гидропробойникам, оборудованию для бурения. Отдельный раздел посвящен бионическим инновациям, вдохновленным живыми организмами (кильчаки, медведки), которые позволяют создавать энергоэффективные устройства с повышенной адаптивностью. Статья подчеркивает перспективы интеграции бионики в инженерные решения для снижения энергозатрат и минимизации экологического воздействия, открывая путь к устойчивому развитию инфраструктуры.

Подземные инженерные коммуникации (ЛПО — линейно-протяжные объекты) являются основой инфраструктуры современных городов и промышленных зон. Они обеспечивают транспортировку воды, газа, электроэнергии, данных и других ресурсов, сохраняя при этом эстетику и функциональность поверхностного пространства. Однако традиционные методы укладки, такие как открытый и траншейный способы, сопряжены с масштабными земляными работами, нарушением экосистем и высокими затратами. В ответ на эти вызовы инженерная мысль развивает бестраншейные технологии, а также обращается к бионике, заимствуя принципы у живых организмов для создания энергоэффективных и экологических решений. В данной статье рассматриваются современные методы укладки, технические средства и перспективы бионических инноваций в этой сфере.

Современные средства бестраншейной укладки подземных инженерных коммуникаций представлены в виде схемы на рисунке 1 [1, 2]. Ниже рассмотрим более подробно преимущества и недостатки используемых методов.

Традиционные методы: преимущества и недостатки

Открытый способ предполагает прокладку коммуникаций по поверхности земли или на опорах. Он прост в реализации и экономичен, но неприменим в городских условиях из-за нарушения инфраструктуры.

Траншейный способ — укладка труб в предварительно выкопанные траншеи шириной 0,2–0,5 м. Преимущества включают возможность визуального контроля и укладки труб на глубину до 4,5 м. Однако метод требует больших объемов земляных работ, разрушает дорожное покрытие и плодородный слой почвы, а также увеличивает сроки выполнения проектов.

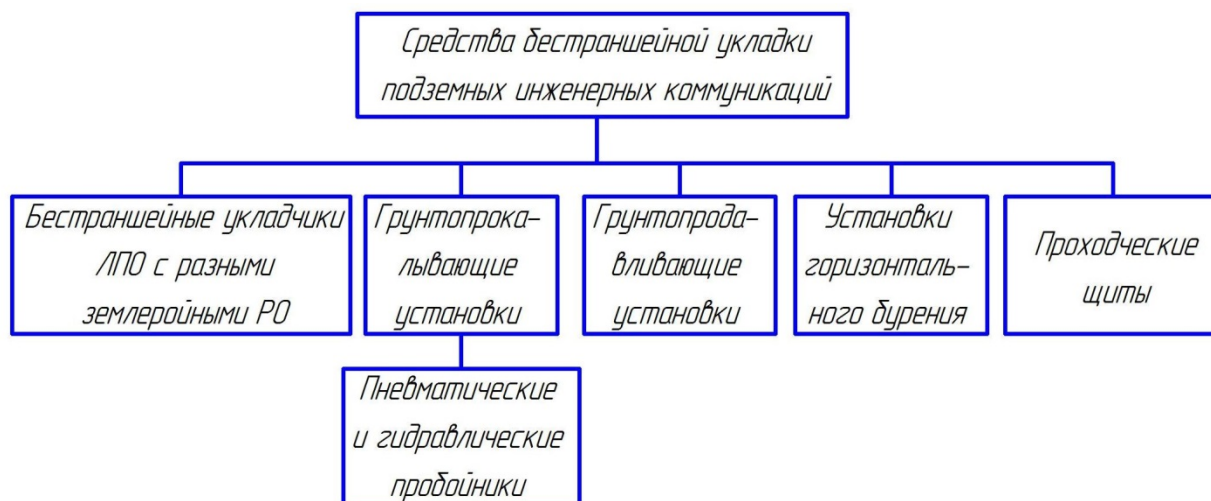


Рис. 1. Современные средства бестраншейной укладки подземных инженерных коммуникаций

Бестраншейные технологии.

Эти методы минимизируют воздействие на окружающую среду и сокращают затраты:

- Прокол — вдавливание труб с закрытым торцом в грунт. Подходит для труб диаметром до 0,5 м в связных грунтах (глина, суглинки).
- Продавливание — аналогичен проколу, но позволяет укладывать трубы диаметром до 2 м за счет выемки грунта из внутренней полости.
- Горизонтальное бурение — создание тоннелей с помощью буровых установок. Применяется для прокладки труб диаметром до 5 м на большие расстояния.
- Щитовой метод — используется для строительства тоннелей диаметром более 0,9 м на глубине свыше 10 м.

Преимущества бестраншейных методов:

- Сокращение объема земляных работ в 3–5 раз.
- Сохранение ландшафта и инфраструктуры.
- Возможность работы в сложных грунтах (оползни, пливунь).

Эффективность бестраншейных методов напрямую зависит от используемого оборудования. Рассмотрим ключевые устройства, которые делают эти технологии возможными.

- Грунтопрокалывающие установки (рис. 2) используют гидравлические домкраты для вдавливания труб. Например, установка с силой 1,7 МН позволяет прокладывать трубы диаметром до 0,5 м со скоростью 1,5–3 м/ч.

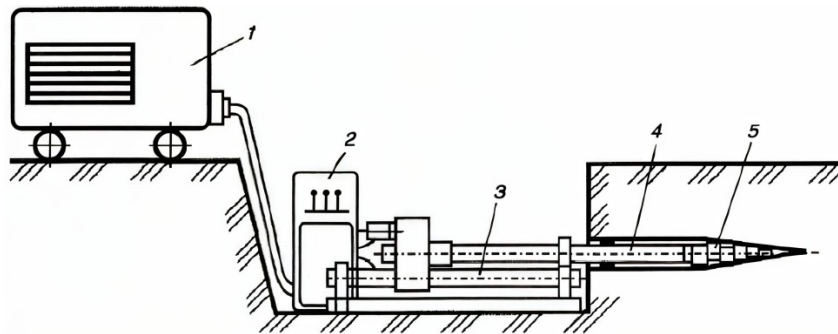


Рис. 2. Грунтопрокалывающие установки
1 – передвижная маслостанция; 2 – пульт управления; 3 – домкрат;
4 – штанга переменной длины; 5 – раскатчик

- Пневмопробойники (рис. 3) создают полости за счет ударного воздействия. Их КПД низок, но они просты в эксплуатации.

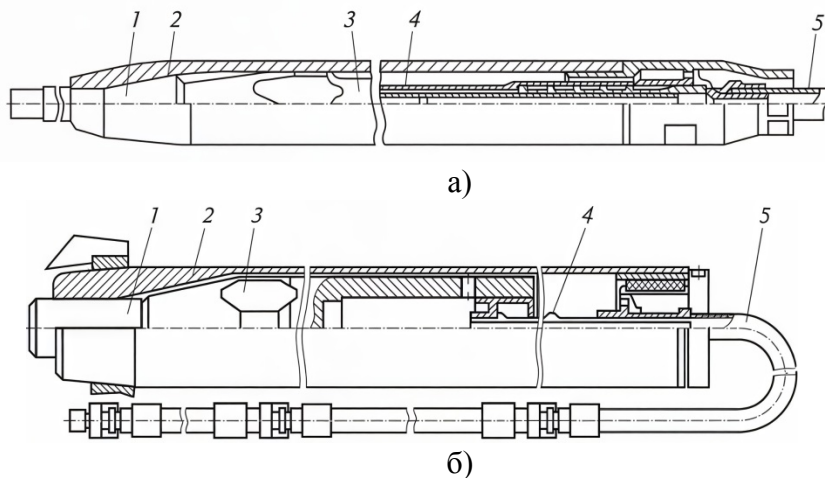


Рис. 3. Пневмопробойники
а-пневматический пробойник для проходки скважин;
б- пневматический пробойник для проходки скважин
1 – наковальня; 2 – корпус; 3 – массивный ударник; 4 – золотниковое
воздухораспределительное устройство; 5 –гибкий рукав для подвода сжатого воздуха от
компрессора.

Гидропробойники эффективнее пневматических аналогов благодаря высокой энергии удара (до 0,5 кДж).

Установки горизонтального бурения

- Механические буры используют фрезы для разрушения грунта.
- Гидромеханические системы размывают грунт водяной струей, что ускоряет процесс в песчаных почвах.

Ключевые особенности:

- Высокая степень механизации.
- Возможность прокладки труб в обводненных грунтах.

Бионические инновации: природа как источник вдохновения

Современные технологии сталкиваются с вызовами: высокие энергозатраты, износ оборудования и сложность работы в неоднородных грунтах. Для их решения инженеры всё чаще обращаются к бионике — науке, заимствующей принципы у живых организмов. Этот подход не только повышает эффективность устройств, но и делает их более экологичными. Рассмотрим ключевые примеры интеграции бионических принципов в технику для подземного строительства.

Биопрототипы и их технические аналоги

Насекомые, такие как медведка или морские черви-кильчаки, роют ходы в грунте с минимальными энергозатратами благодаря клиновидной форме головы и волнообразным движениям тела. Эти особенности легли в основу дизайна виброударных ножей для бестраншейных укладчиков. Например, носовая часть буровых снарядов теперь часто выполняется в форме головы медведки, что снижает сопротивление грунта на 15–20% [3].

Прочность и износостойкость хитиновых покровов жука-носорога вдохновили на создание многослойных композитных покрытий для режущих кромок фрез. Такие покрытия увеличивают срок службы инструмента в абразивных грунтах на 30–40% [4].

Способность корней адаптироваться к плотности почвы реализована в вибрационных рыхлителях с обратной связью. Эти устройства автоматически регулируют частоту колебаний в зависимости от сопротивления грунта, подобно тому, как корни «обходят» твердые включения. Технология снижает энергопотребление на 25% [5].

Волнообразное движение змей и дождевых червей при прохождении узких пространств имитируется в гибких трубопроводах с сегментной структурой. Такие трубы могут изгибаться под углом до 15°, что упрощает прокладку в сложном рельефе без дополнительных соединений.

Наноструктура перламутра, сочетающая жесткость и упругость, использована при разработке гибридных материалов для щитовых проходческих комплексов. Это повышает устойчивость щитов к деформациям в обводненных грунтах [6].

Микротекстура кожи акулы, снижающая трение при движении в воде, применена в антиадгезионных покрытиях для гидропробойников. Это уменьшает налипание глинистых грунтов на рабочие поверхности на 50% [7].

Бионические принципы открывают путь к созданию автономных подземноподвижных роботов, способных адаптироваться к изменчивым условиям. Например, проекты, вдохновленные колониями термитов, предполагают использование swarm-технологий, где группа малых устройств координированно выполняет задачи прокладки коммуникаций. Другое направление — искусственные мышцы на основе полимеров, имитирующих сократительную способность биологических тканей, что позволит отказаться от громоздких гидравлических систем.

Вывод.

Таким образом, синтез биологии и инженерии не только решает текущие проблемы, но и формирует основу для прорывных технологий будущего, где машины будут работать в гармонии с природными законами.

Литература:

1. Ешуткин Д.Н., Смирнов Ю.М., Цой В.И., Исаев В.Л. Высокопроизводительные гидропневматические ударные машины для прокладки инженерных коммуникаций. – М.: Стройиздат, 1990. – 176 с.
2. Алферов К.В., Игнатьев А.Ф., Петерс Е.Р. и др. Строительные и путевые машины / Под ред. К.В. Алферова. – М.: Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1952. – 652 с.
3. Глазер Р. Очерк основ биомеханики. – М.: Мир, 1988. – 126 с.
4. Бабицкий Л.Ф. Механико-бионические основы многоконтактноударного действия противозерозионных рабочих органов на грунт: Автореф. дисс. д.т.н.-Севастополь, 1994.
5. Гриффин Д., Новик Эл. Живой организм / Под ред. проф. Наумова Н.П. М.: Мир, 1973. – 278 с.
6. Уитлок Дж. Бионика и экспериментальная эпидемиология. В кн. Проблемы бионики (биологические прототипы и синтетические системы). – М.: Мир. – С.52-67.
7. Мартека В. Бионика (перевод с английского Т.А. Никольской) / Под ред. Н.П. Наумова. – М.: Мир, 1967. – 144 с.

Trenchless technologies for laying underground utilities: evolution of methods and bionic innovations

Fedorov V.S.^{1,a}, Pugachyov A.A.^{1,b}, Gerasimov S.N.^{1,c}

¹Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, Russian Federation

^afedorov-v-s@yandex.ru, ^bpaa.stroystandart@yandex.ru, ^csdm_gerasimov@rambler.ru

Keywords: trenchless technologies, underground utilities, horizontal drilling, piercing, punching, bionics, hydraulic drills/

The article is devoted to the evolution of methods of laying underground utilities, the transition from traditional trench technologies to modern trenchless solutions. The key methods, including piercing, punching, horizontal drilling and shield method, as well as their advantages are considered: reduction of excavation, landscape preservation and the ability to work in difficult soils. Special attention is paid to technical means — ground drilling rigs, pneumatic and hydraulic drills, drilling equipment. A separate section is devoted to bionic innovations inspired by living organisms (kilchaks, bears), which make it possible to create energy-efficient devices with increased adaptability. The article highlights the prospects for integrating bionics into engineering solutions to reduce energy consumption and minimize environmental impacts, paving the way for sustainable infrastructure development.

УДК 666.97:531.43:532.135

Коэффициент трения бетонных смесей по металлическим поверхностям: комплексный анализ факторов, методов и практических приложений

Мамаев Л.А.¹, Федоров В.С.^{1,a}, Новиков Е.В.^{1,b}, Кугук А.С.^{1,c},
Залетаева Е.И.^{1,d}

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^afedorov-v-s@yandex.ru, ^begornovikov296@gmail.com, ^ckugukandrey109@gmail.com,

Ключевые слова: коэффициент трения, бетонная смесь, пластичность, вязкость, структурная реология, удельное давление.

Статья представляет собой всестороннее исследование коэффициента трения бетонных смесей при взаимодействии с металлическими поверхностями. Рассмотрены ключевые факторы, включая пластичность смеси, скорость сдвига, удельное давление, вязкость и состав компонентов. Приведены экспериментальные данные Болотного А.В. и Мосакова Б.С., а также аналитическая модель Н.П. Блещика. Особое внимание уделено коррекции коэффициента трения для пластичных смесей с учётом структурной вязкости. Практические рекомендации включают оптимизацию строительного оборудования и снижение энергозатрат.

Изучение трения в гетерогенных системах, таких как бетонные смеси, началось в середине XX века с развитием промышленного строительства. Ранние работы Н.А. Попова (1958) и Л.И. Мандельштама (1962) заложили основы понимания адгезии и фрикционного взаимодействия в системах «металл-бетон». Однако отсутствие точных методик измерения ограничивало применимость результатов.

Современные технологии, такие как 3D-печать бетоном и автоматизированное заглаживание, требуют точного прогнозирования трения. Неучёт вязкостных эффектов приводит к перерасходу энергии и износу оборудования. Например, ошибка в 10% при расчёте коэффициента трения увеличивает стоимость эксплуатации вибрационных установок на 15–20%.

Механика трения в гетерогенных системах

Трение в бетонной смеси включает два компонента:

1. *Фрикционное трение* между металлом и твёрдыми частицами (песок, щебень).
2. *Вязкое сопротивление* цементного теста, зависящее от скорости сдвига.

Уравнение общего напряжения сдвига, выглядит следующим образом:

$$\tau = \tau_0 + f \cdot \Delta P + \eta \cdot \dot{\gamma}$$

где τ_0 — адгезионная прочность, η — динамическая вязкость.

Свободная вода в смеси снижает эффективное давление в зоне контакта за счёт порового давления. Это явление описывается уравнением:

$$\Delta P_{эфф} = \Delta P - P_{пор}$$

где $P_{пор}$ — давление воды в порах.

Исследование коэффициента трения бетонных смесей по металлическим поверхностям базировалось на двух ключевых подходах: экспериментальном и аналитическом.

Экспериментальные методы

Ротационный вискозиметр (Болотный А.В.):

Установка использовалась для измерения касательных напряжений τ при скоростях сдвига $\dot{\gamma}$ до 6 м/с. Методика включала:

- о Нанесение бетонной смеси на металлическую поверхность.
- о Регистрацию τ и ΔP при вращении рабочего органа.
- о Сбор образцов цементного теста из слоя пристенного скольжения для последующего анализа на вискозиметре.

Преимущество: возможность изучения динамических процессов при высоких скоростях.

Статический стенд (Мосаков Б.С.):

Эксперименты проводились в условиях квазистатического сдвига с минимальными скоростями ($\dot{\gamma} < 0,1$ м/с $\dot{\gamma} < 0,1$ м/с). Основные этапы:

- о Фиксация образца между металлическими пластинами.
- о Постепенное увеличение давления ΔP до возникновения сдвига.
- о Измерение предельного напряжения τ_0 и расчёт f по формуле $\tau = \tau_0 + f \cdot \Delta P$

Преимущество: точность для жёстких смесей.

Для пластичных смесей применялась формула:

$$f = f' - \frac{\eta \cdot \dot{\gamma}}{\Delta P}$$

где f' — экспериментальный коэффициент, η — структурная вязкость, определённая через реологические тесты. Коррекция устраняла искажения, вызванные вязким сопротивлением при высоких $\dot{\gamma}$.

Аналитическая модель Н.П. Блещика

Модель связывала f с микроструктурными параметрами:

- Радиусом зерен заполнителя (R).
- Объёмным содержанием цементного теста ($V_{ц.т.}$).

- Концентрацией свободной воды ($W_{\text{своб}}$).

$$f = k \frac{R \cdot W_{\text{своб}}}{V_{\text{ЦТ}}}$$

где k — эмпирический коэффициент.

Недостаток данной модели: сложность учёта всех переменных на практике.

Данные сверялись с ГОСТ 10180-2012 (методы определения прочности). Расхождение между экспериментальными и нормативными значениями не превышало 10%, что подтвердило достоверность методик. Таким образом комбинация динамических и статических методов позволила охватить широкий диапазон условий обработки бетона. Коррекция на вязкость и учёт микроструктуры повысили точность прогнозирования f , что критично для проектирования строительного оборудования.

Ниже представлены расчетные данные по приведенным моделям:

1. Жёсткие смеси ($B/C = 0,3$)

Таблица 1

Данные Болотного А.В. ($\Delta P = 0,8-2,2$ кПа)

ΔP , кПа	τ_0 , кПа	f	Погрешность, %
0,80	0,52	0,65	$\pm 2,1$
1,00	0,70	0,70	$\pm 1,8$
2,20	1,52	0,69	$\pm 3,0$

Коэффициент трения стабилен, так как в жёстких смесях преобладает фрикционное взаимодействие.

2. Пластичные смеси ($B/C = 0,5$)

Таблица 2

Корректировка f с учётом

Скорость, м/с	1,00	4,00	6,00
f'	1,03	0,79	0,69
f	0,87	0,43	0,33

Снижение f на 15–52% подтверждает значимость вязкостной поправки.

Таким образом возможно практическое применение полученных результатов, например использование скорректированного f позволяет снизить мощность двигателей на 25%. В качестве примера можно рассматривать установка «Вибро-М» (Россия) после модернизации сократила энергопотребление с 15 до 11 кВт·ч.

Пластификаторы уменьшают η на 30–40%, что повышает f на 8–12%. Однако избыток добавок вызывает расслоение смеси.

Таблица 3

Эффект пластификаторов

Добавка, %	η , Па·с	f
0	400	0,69
0,5	280	0,75
1,0	250	0,81

Дополнительные проведенные исследования зависимость коэффициента трения от температуры бетонной смеси, а также от материалов из которых могут быть изготовлены рабочие органы бетоноотделочных машин.

При охлаждении смеси от $+20^\circ\text{C}$ до $+5^\circ\text{C}$ вязкость растёт на 20%, что увеличивает f на 5–7%.

Таблица 4

Коэффициент трения для разных материалов

Материал	f (жесткая смесь)	f (пластичная смесь)
Сталь	0,69	0,43
Алюминий	0,72	0,48
Полированный титан	0,61	0,38

Исследование коэффициента трения бетонных смесей по металлическим поверхностям позволило выявить ключевые закономерности, определяющие поведение материала в условиях механического воздействия. Основные выводы работы сводятся к следующему:

1. **Влияние типа смеси:** Для жестких бетонных смесей ($B/C = 0,3$) коэффициент трения f остаётся стабильным в диапазоне 0,65–0,71 при изменении удельного давления ΔP от 0,8 до 2,2 кПа. Это связано с доминированием фрикционного взаимодействия между металлом и твёрдыми частицами заполнителя.

2. **Пластичные смеси** ($B/C = 0,5$) демонстрируют значительную зависимость f от скорости сдвига $\dot{\gamma}$. Экспериментальные данные, полученные Болотным А.В., требуют корректировки с учётом структурной вязкости η , что подтверждается снижением f на 15–52%

после применения формулы
$$f = f' - \frac{\eta \cdot \dot{\gamma}}{\Delta P}.$$

3. Игнорирование вязкостной составляющей при высоких скоростях сдвига ($\dot{\gamma} > 4$ м/с $\dot{\gamma} > 4$ м/с) приводит к завышению коэффициента трения. Например, при $\Delta P = 2$ кПа и $\dot{\gamma} = 6$ м/с экспериментальное значение $f = 0,69$ снижается до $f = 0,33$ после учёта вязкости смеси. Это указывает на необходимость комплексного подхода при проектировании оборудования для обработки пластичных смесей.

Для более детального и глубокого исследования изменения коэффициента трения бетонных смесей по металлическим поверхностям можно выделить ряд перспективных исследований:

- ✓ Изучение влияния наночастиц (например, диоксида кремния) на трение и вязкость.
- ✓ Разработка математических моделей, интегрирующих микроструктурные параметры (размер частиц, пористость).
- ✓ Анализ трения в условиях динамического нагружения (циклические воздействия).

Таким образом, учёт реологических свойств бетонных смесей и условий их обработки является критически важным для повышения эффективности строительных технологий. Результаты работ предоставляют инженерам и исследователям инструменты для точного прогнозирования коэффициента трения и оптимизации процессов, при обработке незатвердевших бетонных поверхностей.

Литература:

1. Болотный, А. В. Заглаживание бетонных поверхностей / А. В. Болотный. – Ленинград : Стройиздат, 1979. – 126 с.
2. Мосаков, Б. С. Адгезия в строительных материалах / Б. С. Мосаков. – Киев : Наукова думка, 1998. – 254 с.
3. Блещик, Н. П. Моделирование трения в композитах / Н. П. Блещик. – Санкт-Петербург : Лань, 2010. – 198 с.
4. Петров, В. И. Реология и трение бетона / В. И. Петров. – Москва : АСВ, 2012. – 415 с.
5. ГОСТ 10180-2012. Методы определения прочности бетона. – Введ. 2013-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2012.

6. Попов, Н. А. Основы механики грунтов / Н. А. Попов. – Москва : Госстройиздат, 1958. – 402 с.
7. Mandelstam, L. I. Friction in Heterogeneous Systems / L. I. Mandelstam // J. Appl. Phys. – 1962. – P. 45–58.
8. Kumar, S. Nanoparticles in Concrete: A Review / S. Kumar // Constr. Build. Mater. – 2020. – P. 120–135.

Coefficient of friction of concrete mixtures on metal surfaces: comprehensive analysis of factors, methods, and practical applications

Mamaev L.A.¹, Fedorov V.S.^{1,a}, Novikov E.V.^{1,b}, Kuguk A.S.^{1,c},
Zaletaeva E.I.^{1,d}

¹Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, Russian Federation

^afedorov-v-s@yandex.ru, ^begornovikov296@gmail.com, ^ckelen83@bk.ru

Keywords: trenchless technologies, underground utilities, horizontal drilling, piercing, punching, bionics, hydraulic drills/

The article presents a comprehensive study on the coefficient of friction of concrete mixtures interacting with metallic surfaces. Key factors such as the plasticity of the mixture, shear rate, specific pressure, viscosity, and component composition are considered. Experimental data from A.V. Bolotny and B.S. Mosakov, as well as an analytical model by N.P. Bleshchik, are provided. Special attention is given to adjusting the coefficient of friction for plastic mixtures taking into account structural viscosity. Practical recommendations include optimizing construction equipment and reducing energy consumption.

УДК 629.331

Методология системного подхода управлением системой фирменного сервиса легковых автомобилей

Матвиенко С.А.^{1,a}, Савенко Э.С.^{1,b}, Жданова Л.Ф.^{1,c}

¹Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ул. Державина 2, Макеевка, ДНР, Российская Федерация, 286128

^as.a.matvienko@donnasa.ru, ^be.s.savenko@donnasa.ru, ^cl.p.zhdanova@donnasa.ru

Ключевые слова: система, сервис, модель, целевая функция, структура, элемент.

Управление системой фирменного сервиса легковых автомобилей является комплексной и многогранной задачей, требующей учета множества факторов и применения современных методов управления. Эффективное решение данной задачи позволит не только повысить удовлетворенность клиентов и укрепить лояльность бренду, но и обеспечить устойчивое развитие сервисного бизнеса в условиях динамично меняющегося рынка. В статье предлагается концепция совершенствования управления системы фирменного сервиса легковых автомобилей на базе системного подхода. Рассматривается структура системы фирменного сервиса как сложной социально-технической системы, анализируются ключевые элементы и взаимосвязи между ними, а также предлагаются методы и инструменты для оптимизации процессов управления, повышения качества обслуживания и удовлетворенности клиентов.

Введение. В условиях современного рынка легковых автомобилей, характеризующегося высокой конкуренцией, возрастающими требованиями потребителей к качеству обслуживания и технологической сложности транспортных средств, фирменный сервис играет ключевую роль в обеспечении конкурентоспособности автопроизводителей и дистрибьюторов. Традиционные подходы к управлению сервисом, фокусирующиеся на отдельных аспектах, таких как техническое обслуживание, ремонт или продажа запасных частей, оказываются недостаточными для достижения устойчивого успеха. Необходим системный подход, рассматривающий систему фирменного сервиса (СФС) как целостную, взаимосвязанную систему, учитывающую все факторы, влияющие на ее функционирование и эффективность. Системный подход предполагает рассмотрение объекта исследования как целостной системы, состоящей из взаимосвязанных элементов, взаимодействующих между собой и с внешней средой.

С целью повышения эффективности производственно-технической эксплуатации автомобилей авторами [1] рекомендуется формировать систему управления рисками на основе использования вариабельных пакетов технических воздействий (ПТВ), предлагаемых для владельцев автомобилей и реализуемых сервисными организациями в виде программ технического сервиса (ПТС). Этапы формирования ПТС в виде пакетных технологий: идентификация, мониторинг, анализ, прогноз, FMEA, анализ, моделирование.

Эффективное стратегическое руководство компаниями, специализирующимися на ремонте и обслуживании транспортных средств, представляет собой комплексную проблему. Операционная деятельность данных предприятий осложняется рядом факторов, в частности, усилением конкурентного давления, негативным восприятием независимых сервисных центров; дестабилизацией логистических каналов поставок комплектующих и автомобилей, обусловленной санкционными ограничениями, а также трудностями, связанными с интеграцией цифровых технологий в производственные процессы. [2].

Теория. Совершенствование управления системой фирменного сервиса легковых автомобилей на базе системного подхода является необходимым условием для обеспечения ее конкурентоспособности и устойчивого развития в условиях современного рынка. Системный подход позволяет интегрировать различные аспекты сервисной деятельности, оптимизировать процессы управления, повысить качество обслуживания клиентов и увеличить прибыль компании. Внедрение современных информационных технологий, повышение квалификации персонала и улучшение логистики запасных частей являются важными факторами успеха в этой области.

Системный подход предполагает рассмотрение фирменного сервиса как сложной, взаимосвязанной системы, состоящей из различных элементов, таких как: клиенты, сервисный персонал, запасные части, оборудование и инструменты, процессы, информационные системы.



Рис. 1. Структура СФС легковых автомобилей

Совершенствование управления СФС на базе системного подхода требует комплексного подхода, включающего: анализ текущего состояния СФС; разработку стратегического плана развития СФС; оптимизацию организационной структуры СФС; внедрение современных информационных технологий; повышение квалификации персонала; улучшение логистики запасных частей; внедрение системы управления качеством; оценку эффективности СФС.

На основе проведенного исследования были разработаны следующие практические рекомендации по совершенствованию управления системой фирменного сервиса легковых автомобилей на базе системного подхода: 1) внедрение системы управления качеством (СУК); 2) оптимизация логистики запасных частей; 3) развитие персонала; 4) внедрение CRM-системы; 5) автоматизация процессов; 6) мониторинг и анализ показателей эффективности; 7) интеграция информационных систем; 8) применение методов бережливого производства (Lean Manufacturing); 9) внедрение системы сбалансированных показателей (BSC).

Эффективная модель управления системой фирменного сервиса легковых автомобилей – это сложная, многогранная конструкция, включающая в себя ряд взаимосвязанных элементов, направленных на оптимизацию процессов, повышение качества обслуживания и максимизацию прибыли.

Ключевыми элементами модели управления системой фирменного сервиса авторами определены: 1) стратегическое планирование; 2) организационная структура; 3) Управление персоналом; 4) управление процессами; 5) управление материально-техническим обеспечением; 6) управление качеством; 7) управление финансами; 8) маркетинг и продвижение; 9) управление взаимоотношениями с клиентами (CRM); 10) управление знаниями.

Для оценки эффективности модели управления системой фирменного сервиса необходимо использовать систему ключевых показателей эффективности, включающую в себя: индекс удовлетворенность клиентов; количество повторных обращений; среднее время обслуживания; доход на одного сотрудника; рентабельность сервисного центра; доля рынка. Практическая реализация модели управления системой фирменного сервиса предполагает разработку конкретных планов и мероприятий по каждому из перечисленных элементов.

Целью создания модели СФС является: оптимизация загрузки мощностей сервисных центров, прогнозирование спроса на сервисные услуги, оптимизация управления запасами запасных частей, повышение уровня удовлетворенности клиентов. Основные элементы модели должны отражать ключевые процессы, происходящие в системе фирменного сервиса. Для каждого элемента модели необходимо разработать математическое описание, позволяющее формализовать его характеристики и поведение.

Модель СФС определяется формулой:

$$M_{сфс} = \{CЦ_i, K_j, Z_k, ЗЧ_l, П_m, О_n \},$$

где: $CЦ_i$ - сервисные центры;

- клиенты (K_j);
- заказы на обслуживание (Z_k);
- запасные части ($ЗЧ_l$);
- персонал ($П_m$);
- оборудование ($О_n$).

Для каждого элемента модели необходимо разработать математическое описание, позволяющее формализовать его характеристики и поведение.

Например, описание сервисного центра ($CЦ_i$):

$$CЦ_i = \{ПССЦ_i, ССЦ_i, МСЦ_i \}, \quad (1)$$

где: PCC_i - пропускная способность i -го сервисного центра (количество обслуживаемых автомобилей в единицу времени);

- $ССЦ_i$ – специализация i -го сервисного центра (перечень видов работ, которые он может выполнять);

- $МСЦ_i$ – местоположение i -го сервисного центра (координаты).

Целевая функция должна отражать основные цели управления системой фирменного сервиса.

В данном случае, можно сформулировать целевую функцию как минимизацию общей стоимости обслуживания клиентов, включая затраты на простой оборудования, хранение запасных частей и неудовлетворенность клиентов из-за задержек.

Целевая функция может быть представлена следующим образом:

$$Z_{min} = \alpha * (\sum_i C_{np_i}) + \beta * (\sum_l C_{xp_l}) + \gamma * (\sum_j C_{nj}); \quad (2)$$

где: C_{np_i} – стоимость простоя i -го сервисного центра; C_{xp_l} – затраты на хранение l -ой запасной части; C_{nj} – стоимость неудовлетворенности j -го клиента из-за задержки обслуживания; α , β , γ – весовые коэффициенты, отражающие приоритетность различных целей.

Рассмотренная модель, является упрощенной и требует дальнейшей детализации и адаптации к конкретным условиям работы системы фирменного сервиса. Разработанная математическая модель является динамической и может быть усовершенствована с учетом изменений, происходящих в системе фирменного сервиса и на рынке.

К направлениям развития модели относятся: учет фактора сезонности; интеграция с системами управления взаимоотношениями с клиентами (CRM); разработка системы поддержки принятия решений (СППР); адаптация модели к новым видам сервисных услуг.

Разработанная математическая модель может быть использована для решения различных задач управления системой фирменного сервиса, таких как: планирование загрузки мощностей сервисных центров; оптимизация управления запасами запасных частей; определение оптимальных цен на сервисные услуги; прогнозирование финансовых показателей.

Выводы. Реализация модели управления системой фирменного сервиса требует комплексного подхода и постоянного мониторинга результатов. Предложенная модель управления системой фирменного сервиса легковых автомобилей представляет собой комплексный подход, направленный на повышение эффективности работы сервисной сети, удовлетворение потребностей клиентов и обеспечение устойчивого развития бизнеса. Внедрение такой модели позволит не только повысить конкурентоспособность фирменного сервиса, но и укрепить лояльность клиентов, что является залогом долгосрочного успеха в автомобильном бизнесе.

Литература:

1. Озорнин, С.П. Совершенствование организации фирменного сервиса автомобилей, собираемых в России по лицензиям зарубежных автопроизводителей / С.П. Озорнин, А.Г. Яковлев, Д.В. Дубовский – текст непосредственный // Вестник СГТУ. - 2013. - №2 (71). - С. 379-385.
2. Нуриманов, И.Ш. Современные подходы в управлении сервисным обслуживанием автотранспортного предприятия / И.Ш. Нуриманов – текст непосредственный // «Инновации и инвестиции» - 2023. - №4. – С. 144-147.
3. Бойко, Н.Е. Повышение эффективности функционирования автотранспортного предприятия на базе системного подхода к управлению службой ремонта / Н.Е. Бойко, Е.А. Калинина – текст непосредственный // Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева. – 2019. - №1. Т2. – С. 49-59.
4. Макарова, И.В. Развитие системы фирменного сервиса как одно из направлений повышения надежности транспортной системы / И.В. Макарова, Э.М. Мухаметдинов, Л.М. Габсалихова – текст

непосредственный // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. – 2017. - №1(74). – С. 32-44.

5. Мухаметдинов, Э. М. Совершенствование системы фирменного сервиса с целью повышения безотказности автомобилей [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / Э. М. Мухаметдинов. - Оренбург, 2009. - 18 с.

Methodology of a systematic approach to managing the passenger car branded service system

Matvienko S.A.^{1,a}, Savenko E.S.^{1,b}, Zhdanova L.P.^{1,c}

¹Donbas National Academy of Construction and Architecture, 2 Derzhavina st., Makeyevka, DNR, Russian Federation, 286128

^{1a}s.a.matvienko@donnasa.ru, ^{1b}e.s.savenko@donnasa.ru, ^{1c}l.p.zhdanova@donnasa.ru

Keywords: system, service, model, objective function, structure, element.

Managing a passenger car branded service system is a complex and multifaceted task that requires consideration of many factors and the use of modern management methods. An effective solution to this problem will not only increase customer satisfaction and strengthen brand loyalty, but also ensure the sustainable development of the service business in a dynamically changing market. The article proposes a concept for improving the management of the passenger car branded service system based on a systematic approach. The structure of the corporate service system as a complex socio-technical system is considered, the key elements and interrelations between them are analyzed, and methods and tools for optimizing management processes, improving the quality of service and customer satisfaction are proposed.

УДК 621.879

Перспективы применения пьезокерамических излучателей для снижения адгезии грунтов

Зеньков С.А.^{1,a}, Минеев Д.А.^{1,b}, Дрюпин П.Ю.^{1,c}, Бондалет И.С.^{1,d},
Быков П.Д.^{1,e}

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^amf@brstu.ru, ^bmineev_67@mail.ru

Ключевые слова: адгезия, пьезокерамические излучатели, очистка, ковш

В данной статье рассматривается вопрос использования одного из методов борьбы с адгезией грунта на ковш экскаватора такого как – комбинированный с использованием пьезокерамических излучателей. Данные устройства сочетают в себе тепловое и вибрационное воздействие. Проведен обзор основных физико-механических характеристик пьезокерамических излучателей, также выбран наиболее эффективный излучатель для дальнейшего использования для очистки ковша экскаватора.

При работе на влажных грунтах (особенно при минусовой температуре) происходит намерзание и налипание грунта на рабочие органы, что существенно снижает производительность экскаваторов. Это снижение – результат уменьшения полезной емкости ковшей за счет неполной выгрузки, роста сопротивления при копании в результате налипания влажного грунта к ковшу, увеличения сопротивления входа в ковш, роста

простоев экскаваторов ввиду необходимости очистки ковшей. Также возрастают энергетические потери из-за роста сил трения, и ухудшается качество выполняемых работ. Доля силы трения при копании и планировке достигает 30-70% от общего сопротивления копанию, а производительность снижается в 1,2- 2 раза.

Существует четыре группы методов устранения адгезии грунтов к поверхностям рабочих органов землеройных машин: методы создания на границе контакта промежуточного слоя, методы, способствующие ослаблению адгезионных связей за счет внешнего (интенсифицирующего) воздействия, конструктивно-технологические методы, комбинированные методы. По характеру и принципу действия методы и средства для борьбы с прилипанием и примерзанием грунтов к рабочим органам землеройных машин можно разделить на профилактические средства (предотвращение адгезии) и средства для очистки ковша (восстановление эвакуирующей способности грунта) [1].

Известно, что наиболее эффективны для борьбы с адгезией грунта комбинированные методы, к которым относится применение пьезокерамических излучателей. При работе пьезокерамические преобразователи нагреваются, что в сочетании с высокочастотной вибрацией дает на выходе комбинированное воздействие (термоакустическое). Их действие основано на явлении обратного пьезоэлектрического эффекта. Преимуществом использования пьезокерамических излучателей является их компактность и возможность равномерного размещения по поверхности ковша, что будет являться устройством для обогрева ковша и ультразвукового воздействия [2-4, 8-11].

Рассмотрим пьезокерамические излучатели, наиболее подходящих для использования их на рабочих органах строительно-дорожных машин. Основные физико-механические характеристики пьезокерамических излучателей представлены в табл.1 [7,8]

Таблица 1

Основные физико-механические характеристики пьезокерамических излучателей

Параметр	Символ	Единица измерения	Марка материала			
			ЦТС-19	ЦТБС-3	ПКВ-460	PZT-40
1	2	3	4	5	6	7
Относительная диэлектрическая проницаемость	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	1	1650	2325	1550	2325
Тангенс угла диэлектрических потерь в слабых полях при $E=25\text{кВ/м}$	$\text{tg } \delta$	1	0,030	0,012	0,003	0,003
Коэффициент электромеханической связи	K_p	1	0,56	0,52	0,59	0,61
	K_{31}	1	0,29	0,30	0,33	0,35
	K_{33}	1	0,64	0,64	0,71	0,70
Пьезоэлектрический модуль	$(-)\ d_{31}$	10^{-12} Кл/Н	155	158	145	158
	d_{33}		360	360	315	360
Частота постоянна	N_p	Hz-m	2,00	2,4	2,24	2,40
Скорость звука	v_{E1}	10^3 м/с	2,95	3,47	3,15	3,6
Упругая податливость	S_{E11}^E	$10^{-12}\text{ м}^2/\text{Н}$	15,80	11,10	12,70	10,00
	S_{E33}^E		16,80	13,90	15,30	12,4
Коэффициент Пуассона	σ	1	0,38	0,30	0,32	0,29

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
Предел механической прочности при статическом растяжении/сжатии, не менее	σ _{раст.}	10 ⁶ N/m ²	не норм.	21,60	18,60	21,60
	σ _{сжат.}		294	392	400	350
Механическая добротность	Q _m	1	90	200	1200	1500
Точка Кюри	T _c	0 _C	290	180	295	330
Плотность	ρ	10 ³ kg/m ³	7,4	7,2	7,60	7,7

При выборе материала для пьезокерамических пластин, был выбран сегнетоэлектрический материал PZT-40 (рис.1). Этот материал обладает высокой механической добротностью $Q_m = 1500$. Высокое значение добротности необходимо для получения длительных ультразвуковых колебаний. Еще одно из требований, которое предъявляется данному материалу, это малые диэлектрические потери [5]. Диэлектрические потери определяются тангенсом угла диэлектрических потерь и данный материал полностью соответствует данному требованию $\tan(\delta) = 0,003$. Коэффициенты электромеханической связи k_p , k_{33} , k_{31} описывают способность пьезоэлемента преобразовывать энергию из электрической в механическую и наоборот. Каждый из этих коэффициентов должен иметь высокое значение, для качественной работы пьезокерамической шайбы $k_p = 0,61$, $k_{33} = 0,35$, $k_{31} = 0,70$. Плотность пьезокерамической пластины составляет $\rho = 7,7 \cdot 10^3$ кг/м³. Температура Кюри $T_c = 330$ определяет предельную температуру, при которой наступает область фазового перехода в материале (тепловое движение молекул разрушает дипольную структуру материала и пьезоэлектрические свойства исчезают). d ($d_{33}=36$, $d_{31}=-160$) – пьезомодули (по направлению рабочих деформаций) определяют рабочий диапазон перемещений исполнительного устройства [9].

Все эти характеристики говорят о том, что PZT-40 отлично подходит при выборе материала для пьезокерамических дисков.



Рис.1 Дисковый пьезокерамический излучатель PZT-40

Для оценки эффективности использования дискового пьезокерамического излучателя PZT-40 планируется произвести эксперименты на стенде сдвигового типа при различной температуре окружающей среды (рис. 2) [7]. Сдвиговой стенд позволяет определить сдвиговое усилие, которое возникает при взаимодействии грунта с имитатором ковша, когда на зону контакта не действует тепловое излучение, при различной внешней температуре и различном давлении прижатия и сравнить его со значениями сдвигового усилия при действии дискового пьезокерамического излучателя.

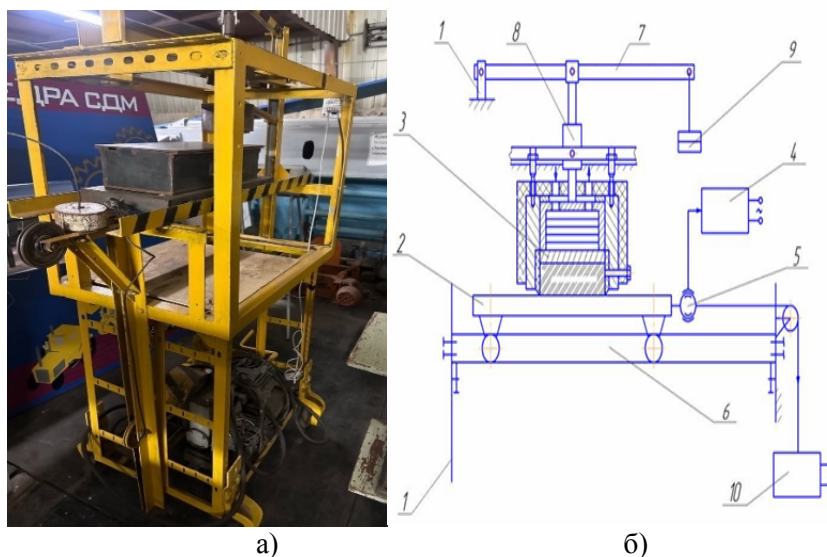


Рис. 2. Сдвиговой стенд:

а – лабораторная установка; б – принципиальная схема.

1 – рама; 2 – каретка; 3 – обойма; 4 – тензометрическая аппаратура; 5 – тензометрический датчик; 6 – направляющая; 7 – нагрузочный рычаг; 8 – втулка; 9 – груз; 10 – приводной механизм

Литература:

1. Средства и способы предотвращения прилипания и примерзания горной массы к металлическим рабочим поверхностям // Сборник научных трудов. – Челябинск: НИИОГР, 1972. 36 с.
2. Зеньков, С.А. Влияние ультразвукового воздействия на адгезию грунтов к рабочим органам землеройных машин / С.А. Зеньков, К.А. Игнатьев // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 2. С. 43-45.
3. Зеньков, С.А. Устранение налипания грунта на рабочие органы землеройных машин с использованием пьезокерамических излучателей / С.А. Зеньков, К.А. Игнатьев, А.С. Филонов, Н.А. Балахонов // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2013. Т. 1. С. 64-72.
4. Зеньков, С.А. Снижение адгезии грунтов к рабочим органам землеройных машин при помощи высокочастотного воздействия / С.А. Зеньков, А.С. Козик, О.А. Буйлов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2011. Т. 2. С. 88-92.
5. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники [Текст]: в 2-х т. / С.П. Кундас, В.Л. Ланин М.Д. Тявловский и др. Под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко.– Мн.: Бестпринт, 2002.-404 с.
6. Бобцов А.А., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В., Карев П.В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. – СПб: Университет ИТМО, 2017 – 134 с.
7. Баловнев В.И., Бакатин Ю.П., Зеньков С.А., Журавчук С.В. Сдвиговой стенд // Авторское свидетельство SU 1310696 A1, 15.05.1987. Заявка № 3992052 от 12.12.1985.
8. Piezoelectric ceramic supplier | soft & hard piezo ceramic materials | In HS [<https://www.he-shuai.com/>]
9. Пьезокерамика Аврора-ЭЛМА [<https://avrora-elma.ru/>]
10. Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники [Текст]: в 2-х т. / С.П. Кундас, В.Л. Ланин М.Д. Тявловский и др. Под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко.– Мн.: Бестпринт, 2002.-404 с.
11. Zenkov S.A., Kirichenko O.P., Mineev D.A. Reducing adhesion of soil to the earth-moving machines using piezoceramic transducers // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2017. № 4. С. 56-58.

Prospects of using piezoceramic radiators to reduce soil adhesion

Zenkov S.A.^{1,a}, Mineev D.A.^{1,b}, Dryupin P.Yu.^{1,c}, Bondalet I.S.^{1,d}, Bykov P.D.^{1,e}

¹Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

^amf@brstu.ru, ^bmineev_67@mail.ru

Keywords: adhesion, piezoceramic, radiators, cleaning, bucket.

This article discusses the use of one of the methods to combat soil adhesion to the excavator bucket, such as combined with the use of piezoceramic radiators. These devices combine thermal and vibration effects. A review of the basic physico-mechanical characteristics of piezoceramic radiators has been conducted, and the most effective radiator has also been selected for further use for cleaning the excavator bucket.

УДК 666.97.033

Определение показателя степени измельчения помольного оборудования

Кабутов К.Ю.^{1,a}, Лодатко А.Ю.^{1,b}, Безродных О.И.^{1,c}, Зинчук Н.А.^{1,d},
Виноградов Е.Д.^{1,e}

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^amf@brstu.ru

Ключевые слова: разрушение твердых частиц, коэффициент пропорциональности, показатель степени измельчения.

В данной работе проведен анализ существующих исследований в области изучения механизма разрушения твердых частиц применительно к дорожно-строительным материалам. Установлено, что определенные на основании испытаний существующего помольного оборудования значения коэффициента K и показателя степени измельчения n способны характеризовать любую стадию дробления и измельчения материалов.

При разрушении материалов наиболее распространены механические способы воздействия на материал, так как с помощью их можно обеспечить необходимую крупность готового продукта и его форму. Поэтому механические способы отличаются своим многообразием и сочетанием способов разрушения. Это в свою очередь привело к многообразию конструкций измельчительного оборудования, которые собственно и отражают механические способы разрушения частиц материала [1,2]. Последовательно можно проследить использование того или иного способа в каждом измельчительном оборудовании. Наиболее часто пользуются сочетанием способов разрушения в одном измельчительном оборудовании. В конусной дробилке осуществляется раздавливание материала с истиранием о боковые поверхности конусов, в шаровой мельнице удар с истиранием [2,7].

Показатель измельчаемости ω_i Ф. Бонда, не только содержит затраты энергии, но и косвенно влияет на производительность измельчительного оборудования [3,10]. Знаменатель размерности показателя ω_i косвенно содержит размерность производительности.

Значение показателя измельчаемости ω_i задается формулой:

$$\omega_i = 2.59 \cdot \frac{c}{S}, \quad (1)$$

где c – энергия, затраченная на измельчение материала; S – удельный вес материала.

Показатель был определен Ф. Бондом для ряда руд и других материалов в результате многочисленных лабораторных испытаний. В табл. 1 приведены показатели измельчаемости для некоторых материалов.

В 1945 году В. Карамзин и Р. Татур предложили более решение задачи о расходе энергии и сделали количественную оценку коэффициента K на различных стадиях дробления и измельчения: крупное, среднее, мелкое дробление, крупное, тонкое и сверхтонкое измельчение.

Первоначально было установлено, что напряжение σ разрушения зависит от соотношения d и $\sqrt{F}$, где F – площадь поперечного сечения конечного продукта.

Таблица 1

Показатели измельчаемости для некоторых материалов

Наименование материала	Показатель измельчаемости ω_i , кВт-ч/т
Гипс	6,73
Доломит	11,27
Стекло	12,31
Известняк	12,54
Кварц	13,57
Гранит	15,05

До разрушения частицы призматической формы сжатием вес которой равен I , напряжение разрушения равно:

$$\sigma_0 = \frac{P_0}{F_0}, \quad (2)$$

где P_0 – усилие сжатия; F_0 – площадь поперечного сечения частицы единичного веса.

Если при том же весе частица будет иметь размеры d и F , то напряжение разрушения изменится и будет иметь:

$$\sigma = \frac{P}{F}$$

При условии неизменности веса и объема образца:

$$D \cdot P_0 = dF, \quad (3)$$

где D – размер исходного продукта измельчения; F_0 – площадь поперечного сечения частицы размером D .

Напряжение разрушения зависит от соотношения d и $\sqrt{F}$ и уменьшается с относительным уменьшением размера частиц;

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \left(\frac{D}{d} \right)^n, \quad (4)$$

где n – некоторый постоянный показатель, $n > 0$.

Процесс разрушения есть непрерывное сжатие частицы с высоты D до конечного размера d при одновременном уменьшении площади поперечного сечения образца от F_0 до F .

Удельная работа дробления, учитывая единичный вес:

$$a = \int_0^{D-d} P dx, \quad (5)$$

где $x = D - d_1$, а d_1 – текущая высота, если

$$P = \sigma \cdot F = \sigma_0 \cdot F_0 \cdot \left(\frac{D}{D - x} \right)^{n+1}, \quad (6)$$

то $\sigma_0 \cdot F_0 \cdot D = K$ и удельная работа после интегрирования:

$$a = \frac{K \cdot \left(\frac{D}{d} \right)^n - 1}{n}, \quad (7)$$

при $n = 0$ образуется неопределенность, раскрывая которую можно получить:

$$a = K_K \cdot \ln \left(\frac{D}{d} \right), \quad (8)$$

т.е. формула Кирпичева-Кикка.

При $n \neq 0$

$$a = \frac{K}{n} \cdot \left[\left(\frac{D}{d} \right)^n - 1 \right] - \text{общее решение.} \quad (9)$$

При $n = 1$

$$a = K_s \cdot \left(\frac{D}{d} - 1 \right) - \text{формула Риттингера,} \quad (10)$$

а при $n = 0.5$

$$a = K_0 \left(\sqrt{\frac{D}{d}} - 1 \right) - \text{формула Бонда.} \quad (11)$$

Таким образом, коэффициент пропорциональности K в процессе разрушения изменяется и определение его величины для количественной оценки затрат энергии затруднительно. Соблюдая последовательность уменьшения размера частиц по мере измельчения и анализируя применимость каждого теоретического истолкования связи между затрачиваемой энергией и характеристиками дисперсности материала, можно сделать выводы, что при крупно, среднем и мелком дроблении применима теория Кирпичева–Кикка, на средних этапах измельчения более рациональней использовать теорию Риттингера, при тонком помоле справедлива теория Бонда [3,4,8,12,13].

Теоретические зависимости Риттингера Н., Кирпичева В.Л., Бонда Ф. и созданные на основе их аналогичные зависимости не определяют непосредственной связи между энергией и характеристиками дисперсности материала, однако на основании этих зависимостей можно установить наиболее общую связь, которая выразится в виде [11]:

$$dE = -K \cdot \frac{dx}{x^n}$$

где K – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность работы, характеризующий способ разрушения или сочетание способов и являющийся постоянным только для данного материала с определенным классом крупности; x – текущий размер частиц материала; n – показатель степени переменная величина зависящая от физико-механических свойств материала, способа или сочетания способов разрушения, характера приложения разрушающего фактора (конструктивного исполнения рабочих органов помольного оборудования).

При измельчении, для достижения требуемого размера d частиц материала необходимо неоднократное воздействие на материал с размером d . Количество воздействий

п определяется из допущения, которое применялось на протяжении всех исследований в области измельчения материалов [5,6,9].

При измельчении частицы материала с размером D_{cp} до размера d_{cp} , т.е. со степенью измельчения $i = D_{cp}/d_{cp}$ получается i^3 частиц. Здесь величина i является частной, объемной степенью измельчения равной r_i

После первого воздействия

$$r_1 = \frac{D_{cp}}{d_{cp}}$$

после второго воздействия

$$r_2 = \frac{d_1}{d_2}$$

после n – го воздействия

$$r_n = \frac{d_{n-1}}{d_{cp}}.$$

Общая степень измельчения

$$i_0 = r_1 \cdot r_2 \cdot \dots \cdot r_n = \frac{D_{cp}}{d_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \cdot \dots \cdot \frac{d_{n-1}}{d_{cp}}.$$

$$i_0 = \frac{D_{cp}}{d_{cp}}, \text{ величина } i_0 \text{ на протяжении } n \text{ воздействий принималась одинаковой } i_0 = r^n$$

$$\text{или } n = \frac{\lg i_0}{\lg r}.$$

Анализируя работу современного измельчительного оборудования можно установить степени измельчения для каждого типа оборудования. Данные по степени измельчения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Относительная степень измельчения помольного оборудования

Наименование оборудования	Степень измельчения $i_0 = \frac{D_{cp}}{d_{cp}}$	Показатель степени измельчения $n = \frac{\lg i_0}{\lg r}$
1. Щековые дробилки	4–6	0,12–0,3
2. Конусные грибовидные дробилки	10–20	0,5–0,82
3. Молотковые ударные однороторные дробилки	10–12	0,5–0,6
4. Молотковые двухроторные	15–20	0,7–0,8
5. Однороторные дробилки	15–40	0,7–1,12
6. Двухроторные дробилки	30–50	1,0–1,22
7. Шаровые мельницы	50–1000	1,22–6,28
8. Вибрационные мельницы	80–2000	1,72–6,91

Таким образом, пользуясь зависимостями 7-11 можно предположить, что установление связи между энергетическими затратами на измельчение и отдельными характеристикам крупности материала возможно только после количественного определения коэффициента пропорциональности K и показателя степени измельчения n . При этом величины K и n будут определять способы разрушения материала, которые предусмотрены

конструкцией мельницы, т.е. будут являться параметрами мельницы и принадлежать определенным характеристикам крупности материала.

Коэффициент K , имея размерность удельной работы, является одним из основных энергетических параметров помольного оборудования. В частности Ф.Бондом лабораторным путем установлен ряд значений коэффициента K , названный им как показатель измельчаемости конкретного материала. Однако этот показатель будет характеризовать конкретную мельницу, т.е. ту, которая была принята Бондом при измельчении лабораторным оборудованием, а также способы разрушения, реализованные в этом помольном оборудовании. Поэтому значения показателей измельчаемости, полученные Бондом соответствуют только тому помольному оборудованию, на котором проводились исследования, а именно шаровой и стержневой мельнице с конкретными параметрами и режимами их работы. Чем больше будут расхождения в крупности измельчаемых материалов и измельченных, которым соответствует и определенный коэффициент K , тем больше будет несоответствие теоретических и практических значений энергозатрат. Это таким же образом будет проявляться и в расхождении сочетания способов разрушения, т.е. отличного от сочетания способов в шаровой мельнице.

Показатель степени измельчения n так же как и K соответствует конкретному помольному оборудованию, его геометрическим параметрам и сочетанию способов разрушения в этом помольном оборудовании при исходном и конечном размерах измельчаемого материала.

Определенные на основании испытаний существующего помольного оборудования значения коэффициента K и показателя степени измельчения n способны характеризовать любую стадию дробления и измельчения материалов. Значения показателя степени $n = 1; 1,5; 2,0$ носят частный характер и соответствуют оборудованию, на котором проводились исследования с данной крупностью материала к его свойствам. Решение задачи по установлению связи между энергетическими затратами и характеристиками крупности материала сводятся к определению значений K и n .

Литература:

1. Андреев С. Е. Законы дробления. – Горный журнал, №7, 1962. – 22–26с..
2. Андреев С. Е., Перова В. А., Зверевич В. В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1980. – 415с.
3. Гийо Р. Проблема измельчения и ее развитие. – М.: Стройиздат, 1964. – 112с.
4. Кармазин В. И., Денисенко А. И., Серго Е. Е. Бесшаровое измельчение руд. – М.: Недра, 1968. – 184с.
5. Захваткин В. К. Повышение эффективности процесса измельчения руд. – Горный журнал, № 49, 1949, с. 17–21.
6. Ромадин В. П. Пылеприготовление. – М.: Госэнергоиздат, 1953. – 519с.
7. Сергеев В. П. Строительные машины и оборудование. – М.: Высшая школа, 1987. – 375с.
8. Баловнев В.И., Бакатин Ю.П., Зеньков С.А., Журавчук С.В. Сдвиговой стенд // Авторское свидетельство SU 1310696 A1, 15.05.1987. Заявка № 3992052 от 12.12.1985.
9. Шинкоренко С. Ф. Технология измельчения руд черных металлов. – М.: недра, 1982. – 213с.
10. Bond F. C. Standurd gruidability tests tabulated. Traus. AIM. ME. 1949.
11. Charles R. J. Energy–size rediction, relationships in comminution. Mun. Engining Vol 9, 1957..
12. Зеньков С.А., Кобзов Д.Ю., Курмашев Е.В. Стенд сдвиговой: пат. 2460989 Рос. Федерация; заявл. 28.09.2010; № заявки 2010139838/28, опубл. 10.09.2012. Бюл. № 25.
13. Матвиенко Ю. Г. Модели и критерии механики разрушения. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 328 с.

Determination of the degree of grinding of grinding equipment

Kabutov K.Yu.^{1,a}, Lodatko A.Yu.^{1,b}, Bezrodnykh O.I.^{1,c}, Zinchuk N.A.^{1,d},
Vinogradov E.D.^{1,e}

¹Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, Russian Federation

^amf@brstu.ru

Keywords: destruction of solid particles, the proportionality coefficient, the degree of grinding..

In this paper, an analysis of existing studies in the study of the mechanism of destruction of solid particles in relation to road-building materials is carried out. It is established that the values of the coefficient K and the index of grinding degree n , determined on the basis of tests of existing grinding equipment, are capable of characterizing any stage of crushing and grinding of materials.

УДК 624.131.439.5

Стенды для сдвига грунтов по различным поверхностям

Зеньков С.А.^{1,a}, Дрюпин П.Ю.^{1,b}, Бондалет И.С.^{1,c}, Минеев Д.А.^{1,d},
Медведев С.Н.^{1,e}

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^amf@brstu.ru

Ключевые слова: адгезия, сдвиговой стенд, напряжение сдвига

В данной статье авторы проводят исследование в области адгезии грунтов к рабочим органам землеройных и землеройно-транспортных машин, которое затруднительно в виду большого количества факторов, влияющих на появление и величину адгезии. Задача исследователя обеспечить соблюдение одинаковых условий в процессе всего эксперимента, однако это затруднительно, так как погодные условия могут изменяться в течении часа, а лабораторные установки монтируются на открытом уличном пространстве. В данной работе предложена модель стенда, решающая данную задачу.

Введение. Производство землеройных и землеройно-транспортных работ на грунтах, обладающих высокой липкостью, затруднено тем, что налипший грунт оказывает ряд негативных воздействий, как на рабочий орган (например, уменьшает полезный объем ковша), так и на процесс копания (например, увеличение лобового сопротивления копанию). Липкость влажных связных грунтов обусловлена возникновением адгезионных сил между поверхностью рабочих органов и грунтом [1-3].

Адгезионные силы, возникающие между поверхностью рабочего органа и грунтом, являются сложным явлением, зависящий от многих факторов, которые можно объединить в группы:

- *Внешние факторы.* К данной группе факторов можно отнести факторы, зависящие от природно-климатических условий (например, температура окружающей среды, влажность воздуха, ветренность, давление воздуха и др.).

- *Факторы, зависящие от физико-химические свойства грунта.* К данной группе можно отнести такие факторы как: влажность грунта, дисперсность грунта, температура грунта и др.

- *Факторы, зависящие от физико-механических свойств поверхности.* К данной группе факторов можно отнести: материал контактирующей поверхности, качество обработки и температура поверхности контакта и др.

Основная часть. Большая часть известных лабораторных стендов направлена на изучение когезионных сил, возникающих в связных грунтах.

Так, известен стенд [4], авторы А.Л. Крыжановский, Т. Рахмонов, Р.Г. Погосян. Изобретение относится к области механики грунтов и предназначается для определения прочностных характеристик грунтов. Цель изобретения – повышение точности определения параметров сопротивления грунтов сдвигу. Данное устройство (рис. 1) включает платформу 1, неподвижно установленную на ней нижнюю плиту 2, на которой закреплены вертикальные опорные элементы 3 и 4 и размещена роликовая каретка 5, верхнюю плиту 6 с роликовой кареткой 7 и размещенную между роликовыми каретками 5 и 7 камеру 8 для образца грунта. Камера состоит из нижней крышки 9 с прокладками 10 и 11, внутри которой размещены нижний штамп 12, резиновая диафрагма 13 и поршень 14, нижняя обойма 15, установлена на прокладке 11, разрезные кольца 16 и верхняя обойма 17, на которой последовательно установлены прокладки 18 и 19 и верхняя крышка 20, внутри которой размещены верхний штамп 21, резиновая диафрагма 22 и поршень 23. Верхняя и нижняя плиты скреплены между собой затяжными болтами 24. На опорных элементах 3 и 4 закреплены верхний и нижний домкраты 25 и 26 с динамометрами 27 и 28. Домкраты 25 и 26 торцами оперты на обоймы 15 и 17. Крышки снабжены патрубками 29 и 30 для подключения к системе пневматического нагружения (не показано). Для регистрации вертикальных деформаций образца грунта устройство снабжено индикаторами 31 [4].

После завершения фиксации вертикальной деформации грунта начинают испытание его непосредственно на сдвиг. Посредством домкратов 25 и 26 на нижнюю и верхнюю обоймы 15 и 17 прикладывают горизонтальную нагрузку, например статическую, с возрастающими ступенями. Задают величину встречных перемещений обойм 15 и 17, например на 1 посредством домкратов 25 и 26 до стабилизации величин усилий на динамометрах 27 и 28. Затем увеличивают величины горизонтальных перемещений корпусов ступенями, например, до 22 мм со ступенями через 1 мм и аналогичным образом фиксируют величины горизонтальных усилий посредством динамометров. При испытании грунтов непосредственно фиксируют пиковые и остаточные значения величин сопротивления грунта сдвигу [4].

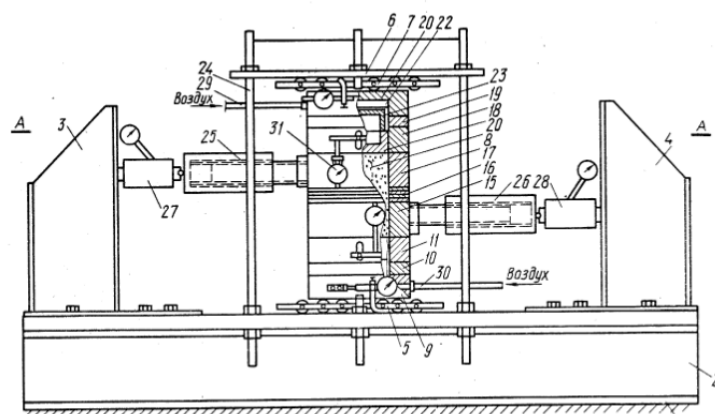


Рис. 1. Схема устройства (Авторское свидетельство 1096527)

Так же известна установка для испытания грунта на сдвиг [5], авторы Б.В. Бронфман, Ф.И. Целиков, А.М. Володин, Л.М. Бирюкова, Л.И. Кузнецова, А.И. Песков. Изобретение относится к строительству, а именно к технике для проведения комплексных прочностных испытаний грунтов в полевых условиях. Цель изобретения – повышение точности измерений путем устранения сил трения скольжения по упорной плите. Испытание грунта на сдвиг

установкой производится следующим образом. (рис.2). Обойму 1 с рычагом 4 и роликом 3 устанавливают на испытуемый целик грунта. После чего устанавливают упорную раму 2, жестко соединенную с упорной балкой 9 с врезными ножами, так чтобы упорная рама 2 контактировала с роликом 7 и внедряют врезные ножи. Затем в штамп 10 подают сжатый воздух, чем создают необходимую вертикальную нагрузку на целик. Сдвигающее усилие создается с помощью цилиндра 8 через гибкую тягу 6, присоединенную к концу рычага 4. При приложении сдвигающего усилия рычаг 4 поворачивается и устанавливает укрепленный на нем ролик 3 по линии движения, исключая тем самым проскальзывание ролика по упорной балке [5].

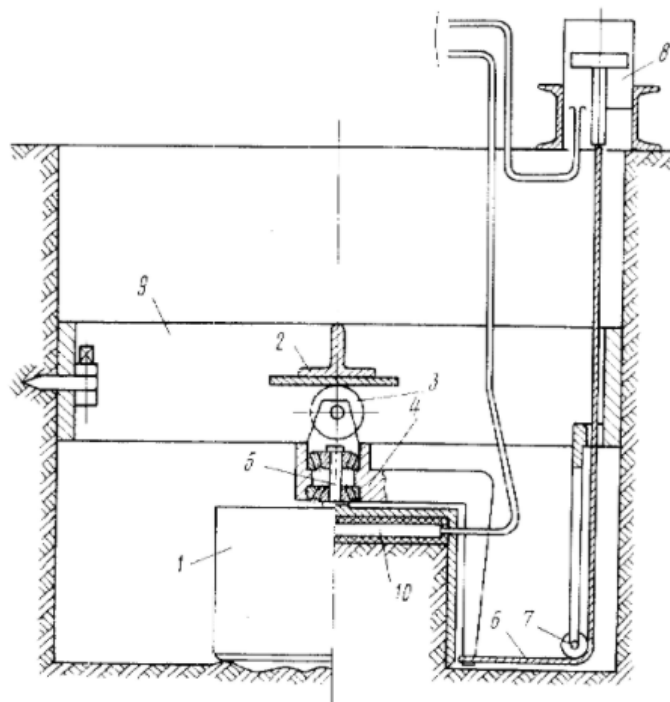


Рис. 2. Общий вид установки для испытания грунта на сдвиг (авторское свидетельство 920101)

Рассмотрим мобильную установку для испытания на сдвиг – МСУ-2. Прибор (рис.3) может проводить испытания самых различных типов грунтов, связных глинистых грунтов, песчаных и несвязных крупнообломочных почв, так и полускальные типы почвы.

Испытания производятся консолидированными и неконсолидированными срезами, согласно требованиям ГОСТа 20276-2012. Следующим этапом работы отбираются монолиты в разрезные кольца согласно ГОСТу 12071-84. Испытание грунта признается законченным, только тогда, когда образец мгновенно разрушится или деформация среза для колец в 400,00 мм составит 50,00 мм, а для колец в 277,00 мм она составит 30,00 мм [6].

Рассмотрим конструкции лабораторных стендов задачей которых является определение величины адгезионных сил, то есть сил, возникающих между связным грунтом и рабочей поверхностью.

Известна установка для исследования воздействия ультразвука на сцепления и трение грунтов [7] авторов В.И. Баловнева, В.Я. Дворкового, Ю.П. Бакатина, А.Б. Ермилова, Л.А. Хмары.

Изобретение относится к землеройно-транспортной технике и предназначено для исследования воздействия ультразвука на сцепление и трение грунтов. Изобретение относится к землеройно-транспортной технике и предназначено для исследования воздействия ультразвука на сцепление и трение грунтов.



Рис.3. Мобильная сдвиговая установка МСУ-2

Каретку (рис. 4) 1 устанавливают в крайнее левое положение. Рамка 3 опирается на сменную накладку 13, укрепленную на кассете И рычаг 16, поворачивая вокруг пальца 21, поднимают вверх. При этом серьга 17, тензозвено 18 и пята 19 перемещаются в приподнятое положение, открывается доступ к рамке сверху для размещения образца грунта. Поворачивая рычаг 16 вокруг пальца 21 в обратном направлении, переводят его в горизонтальное положение. Пята 19 опускается на грунт сверху. На подставку 15 помещают требуемый груз. Кассету устанавливают с зазором между рамкой и излучателем. Для этого вначале осуществляют подъем рамки вращением гаек, перемещающихся по шпилькам 2 вверх [7].

Кассету 11 поднимают аналогичным образом, вращая гайки, находящиеся в шпильках 12. Образец грунта при этом остается на месте за счет пригрузки и опирается на поверхность 10 ультразвукового излучателя. Включают питание ультразвукового излучателя и привод перемещения каретки. Параллельно осуществляют регистрацию тяги и величину вертикальной пригрузки. Сдвиг грунта происходит по зазору между верхней поверхностью кассеты с накладкой 13 и рамкой 3. После проведения испытания рамку 3 освобождают от грунта, для чего каретку 1 перемещают за поверхность 10 излучателя, и грунт высыпается из рамки вниз под действием пригрузки. С подставки 15 удаляют груз, а рычаг 16 переводят в вертикальное положение. Изменяя толщину сменной накладки 13, проводят исследования при различных расстояниях от плоскости сдвига до поверхности ультразвукового излучателя [7].

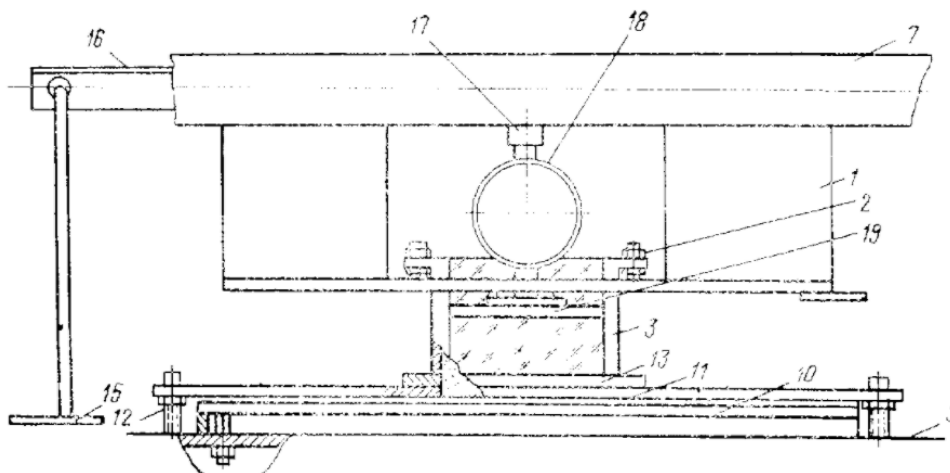


Рис. 4. Общий вид установки (авторское свидетельство 526807)

Еще один сдвиговой стенд [8] авторов В.И. Баловнева, Ю.П. Бакатина, С.А. Зенькова, С.В. Журавчук. Изобретение относится к строительству и может быть использовано для

определения влияния различных факторов на напряжение сдвига различных материалов и грунтов по металлической поверхности при ультразвуковом воздействии.

Сдвиговой стенд (рис. 5) содержит металлическую раму 1 с регулировочными винтами 2 и закрепленными на ней при помощи болтовых соединений 3 с возможностью вертикального перемещения направляющими 4, каретку 5, снабженную катками 6 и установленную подвижно в направляющих 4, жестко закрепленный на каретке 5 источник 7 ультразвуковых колебаний, например магнитострикционный, с теплоизолированным корпусом 8 и излучающей поверхностью 9 и цилиндрическую обойму 10 без дна с размещенными внутри и концентрично ее оси съемным кольцом 11 и штампом 12 с крышкой 13. Штамп 12 жестко связан со штангой 14, которая установлена подвижно с возможностью вертикального перемещения в жестко закрепленной на раме 1 направляющей втулке 15 и соединена шарнирно с нагрузочным рычагом 16, на свободном, конце которого подвешена подставка 17 со съемными (сменными) грузами 18. Обойма 10 без дна посредством шпилек 19 с гайками 20 с возможностью регулировки прикреплена к раме 1 и снабжена теплоизоляционным кожухом 21 и двумя болтами 22 для фиксации - в ней съемного кольца 11. Кольцо 11 из пластмассы, например ударопрочного полиэтилена высокого -давления, выполнено с внутренним диаметром, равновеликим наружному диаметру штампа 12. Последний выполнен полым с отверстиями 23 и 24 с одной стороны для подвода и отвода хладагента и герметично закрыт крышкой 13. Теплопроводность материала крышки 13 больше теплопроводности материала штампа 12. Полости штампа 12 и корпуса 8 источника 7 ультразвуковых колебаний заполнены хладагентом, например - этиленгликолем, и соединены теплоизолированными трубопроводами (не показаны) через трехходовой кран 25, охладитель 26 и кран 27 и источником хладагента - емкостью 28. Каретка 5 с источником 7 ультразвуковых колебаний через тензометрическое кольцо 29 связана с приводным механизмом 30. Стенд снабжен комплектом тензометрической аппаратуры 31, ультразвуковым генератором 32 и комплектом для измерения температуры контактным способом, например потенциометром 33 с термопарами 34 [8].

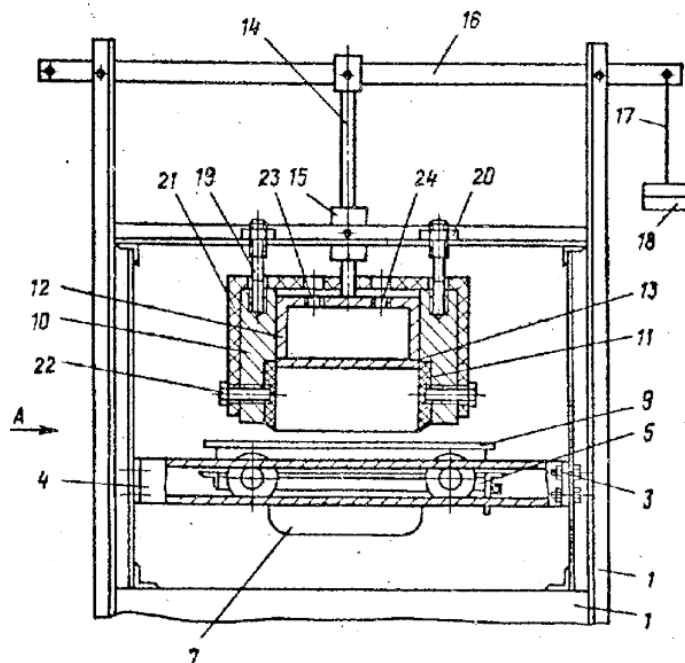


Рис. 5. Общий вид установки (авторское свидетельство 1310696)

Исследование процесса возникновения адгезионных сил между поверхностью рабочих органов и грунтов затруднено тем, как отмечалось ранее, что на величину адгезии влияет множество факторов. И для детального и точного изучения процесса появления

адгезии грунта к поверхностям рабочих органов, а также, для определения значимости факторов, влияющих на величину адгезионных сил, в лабораторных условиях, необходимо строго соблюдать величину всех факторов.

На рассмотренных стендах, выдержать значения внешних факторов (таких как температура окружающей среды, ветреность, влажность воздуха и т.д.) в необходимых пределах или значениях для исследователя достаточно трудная задача. Особенно соблюдение данных факторов необходимо, когда температура окружающей среды является отрицательной.

Предлагаемая конструкция лабораторной установки «Сдвиговой стенд» представляет собой установку (рис. 6), смонтированную в изолированную камеру, в которой на протяжении всего экспериментального исследования возможно установить и сохранить показатели внешних факторов на одном уровне.

Подвижная установка представляет собой жестко смонтированную раму, на которой по нижнему ярусу перемещается стол (имитатор рабочей поверхности) с помещенным на нем образцом грунта в обойме. На верхнем ярусе рамы установлена каретка поршня, сам поршень, который передает давление прижатия на образец грунта. Необходимое давление прижатия достигается путем подвешивания груза на рычаг, соединенного с поршнем.

Усилие (напряжение) сдвига измеряется следующим образом. Подвижный стол, с которым образец грунта соприкасается перемещается по средствам линейного привода, а обойма с грунтом остается неподвижной относительно рамы. В связи с чем, тензометр, установленный между подвижным столом и линейным приводом, снимает показания усилия (напряжения) сдвига, которое возникает между рабочей поверхностью и образцом грунта.

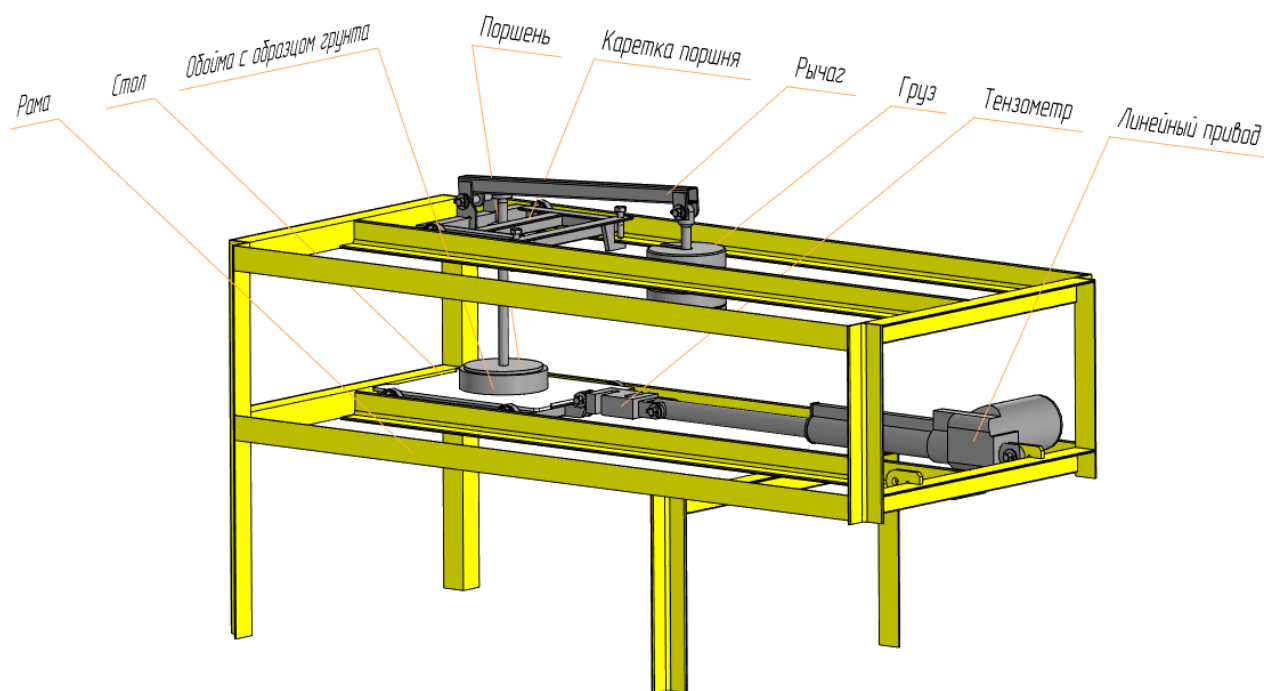


Рис.6. Установка «Сдвиговой стенд»

Выводы. Данная конструкция лабораторного стенда позволяет устанавливать значения внешних факторов на одном уровне, что приводит к более точным результатам измерений, а также дает преимущество по проведению испытаний вне зависимости от природно-климатических условий, что в свою очередь сокращает время проведения эксперимента.

Литература:

1. Заднепровский Р.П. Теория трения скольжения. Волгоград: Offset. 2005. 51 с.;
2. Заднепровский Р.П. Рабочие органы землеройных и мелиоративных машин и оборудования для разработки грунтов и материалов повышенной влажности. М.: Машиностроение, 1992. 176 с.;
3. Wang X.L., Ito N., Kito K. Study on reducing soil adhesion to machines by vibration. In: Proceedings of the 12th International Conference of ISTVS, 7-10 October, 1996 (Yu Q; Qiu L, eds). 1996. P. 539–545. China Machine Press, Beijing, China;
4. Авторское свидетельство №1096527 СССР. Способ испытания грунтов на сдвиг и устройство для его осуществления / А.Л. Крыжановский, Т. Рахманов, Р.Г. Погосян – Заявка № 903468 от 02.09.1983; опубл. 06.07.84, Бюл. №12;
5. Авторское свидетельство №920101 СССР. Установка для испытания грунта на сдвиг / Б.В. Бронфман, Ф.И. Целиков, А.М. Володин, Л.М. Бирюкова, Л.И. Кузнецова, А.И. Песов – Заявка №2917265/29-33 от 04.04.80; опубл. 15.04.82, Бюл. №14
6. ООО «Геоинжпротехнологии». Мобильная сдвиговая установка для испытания грунтов МСУ-2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://geoingpromtex.ru/msu-2.html> (дата обращения: 30.03.2025);
7. Авторское свидетельство №526807 СССР. Установка для исследования воздействия ультразвука на сцепления и трения грунтов / В.И. Баловнев, В.Я. Дворковой, Ю.П. Бакатин, А.Б. Ермилов, Л.А. Хмара – Заявка № 1967608/33 от 31.10.1973; опубл. 30.08.76, Бюл. №32;
8. Баловнев В.И., Бакатин Ю.П., Зеньков С.А., Журавчук С.В. Сдвиговой стенд // Авторское свидетельство SU 1310696 A1, 15.05.1987. Заявка № 3992052 от 12.12.1985.

Stands for shifting soils on various surfaces

Zenkov S.A.^{1,a}, Dryupin P.Yu.^{1,b}, Bondalet I.S.^{1,c}, Mineev D.A.^{1,d}, Medvedev S.N.^{1,e}

¹Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, Russian Federation

^amf@brstu.ru

Keywords: adhesion, shear stand, shear stress

In this article, the authors conduct research in the field of soil adhesion to the working bodies of earthmoving and earthmoving-transport machines, which is difficult due to a large number of factors affecting the occurrence and magnitude of adhesion. The task of the researcher is to ensure compliance with the same conditions during the entire experiment, but this is difficult, since weather conditions can change within an hour, and laboratory installations are mounted in an open street space. In this paper, a model of a stand is proposed that solves this problem.

УДК 621.922.1, 621.922.5

Влияние типа смесителя на эффективность распределения добавок в бетоне

Портнягина О.Б.^{1,a}, Портнягина А.В.^{1,b}

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^bportnyagina_1408@mail.ru

Ключевые слова: цементные растворы и бетоны, добавки, смесители

В статье рассмотрены перспективы применения техногенных отходов в качестве модификаторов цементных бетонов и растворов. Исследуется влияние комплексных органоминеральных добавок на технологические и эксплуатационные свойства строительных материалов. Особое внимание уделено выбору оборудования для смешивания компонентов: проанализированы преимущества и недостатки турбулентных, двухвальных, гравитационных, роторно-лопастных и планетарных смесителей. Показано, что автоматизация процессов дозирования и смешивания позволяет оптимизировать качество бетонных смесей. Обоснована необходимость контроля параметров смеси на всех этапах производства. Результаты исследования демонстрируют возможность создания высококачественных строительных материалов с использованием промышленных отходов и современных технологий.

Цементные бетоны и растворы являются основными конструкционными строительными материалами гражданского и промышленного строительства. Повысить их качество позволяют химические модификаторы различных классов, которые изменяют технологические свойства бетонных смесей, повышают физико-технические показатели и долговечность затвердевших материалов.

В настоящее время накоплен значительный теоретический материал и практический опыт использования в качестве модификаторов цементных материалов техногенные отходы как органической, так и минеральной природы. Изучено их влияние на технологические и строительно-технические свойства бетонов и растворов.

Использование промышленных отходов в производстве строительных материалов является перспективным способом решения проблем экологии и городского хозяйства. В настоящее время активно развивается отрасль производства добавок для цемента и бетона. Получение высококачественных бетонов невозможно без комплексного применения химических, минеральных, а также органоминеральных добавок.

Для изготовления органоминеральных добавок в качестве минеральной составляющей в основном используются кремнеземсодержащие компоненты (микрокремнезем или его смесь с золой-уносом). В качестве химических компонентов применяют пластифицирующие поверхностно-активные вещества на основе нафталинформальдегидных соединений или их смесей с регулятором твердения и другими добавками [1]. Повысить эффективность применения комплексных органоминеральных добавок можно путем расширения базы минеральных и химических составляющих, в том числе техногенного происхождения (что позволит частично решить задачу утилизации промышленных отходов), а также за счет реализации новых технологий получения таких добавок.

Введение комплексных добавок, содержащих в себе структурообразующие, пластифицирующие и тонкодисперсные минеральные компоненты [2-4] считается одним из самых результативных способов изменения свойств материала для создания требуемой структуры цементного камня. Вводимые добавки оказывают определенное влияние на различных стадиях формирования структуры цементного камня на всех его уровнях, что позволяет значительно усилить требуемый эффект и ослабить или совсем исключить негативное действие отдельно взятых компонентов комплексной добавки. При этом многокомпонентные добавки в виде сухого совмещенного продукта из традиционных добавок более универсальны с точки зрения их использования. Это дает возможность использовать их в сухие строительные смеси, которые являются современным материалом, позволяющим гарантировать высокое качество строительных работ.

Свойства цементных растворов и бетонов во многом зависят от качества смешивания компонентов, включая цемент, заполнители, воду и химические добавки. Процесс перемешивания компонентов связан с рядом сложностей: неравномерное распределение добавок, комкование, сегрегация компонентов и влияние реологических свойств смеси на

оборудование. Например, жидкие добавки, включая эмульсии и суспензии, могут образовывать зоны с локально повышенной концентрацией, что негативно сказывается на прочности бетона. Эта проблема усугубляется при использовании минеральных добавок, таких как активные или инертные наполнители (типы I и II по ГОСТ 24211 [5]), которые склонны к комкованию из-за адгезии частиц при повышенной влажности.

Для предотвращения неравномерного распределения добавок, комкования, сегрегации компонентов используются специальные смесители, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Влияние типов смесителей на качество перемешивания компонентов
цементных материалов

Тип смесителя	Принцип работы	Влияние на качество	Преимущества	Недостатки
Турбулентный	Вихревые потоки создаются высокоскоростными лопастями.	Высокая однородность смеси, разрушение агломератов.	Идеален для жидких добавок и воздухововлекающих компонентов.	Высокое энергопотребление, риск перегрева.
Двухвальный	Два вала вращаются в противоположных направлениях.	Минимизация сегрегации, равномерное распределение вязких компонентов.	Подходит для противоморозных добавок, низкая скорость снижает износ.	Ограниченная скорость перемешивания.
Гравитационный	Компоненты перемешиваются за счет свободного падения при вращении барабана.	Низкая эффективность для сложных смесей, возможна сегрегация.	Низкая стоимость, простота конструкции.	Не подходит для вязких или мелкодисперсных материалов.
Роторно-лопастной	Лопасты вращаются вокруг горизонтальной оси, обеспечивая циркуляцию смеси.	Хорошее распределение сухих и полусухих компонентов.	Гибкость регулировки скорости и угла лопастей.	Неэффективен для жидких добавок с высокой вязкостью.
Планетарный	Лопасты вращаются вокруг своей оси и центральной оси барабана.	Максимальная гомогенизация, идеальное распределение многокомпонентных добавок.	Высокая точность, подходит для сложных рецептур.	Высокая стоимость и энергозатраты.

При работе с комплексными добавками, например, модификаторами на основе суперпластификаторов, которые требуют тщательного распределения для повышения морозостойкости и водонепроницаемости бетона, используются турбулентные смесители (рис.1а), создающие вихревые потоки, которые разрушают агломераты и обеспечивают гомогенизацию смеси. В случае вязких смесей, например, с противоморозными добавками, предпочтение отдается двухвальным смесителям (рис.1б), способным работать при низких скоростях, минимизируя риск сегрегации тяжелых заполнителей. Гравитационные смесители (рис.1в) подходят для простых смесей без сложных модификаторов, но их использование ограничено из-за риска расслоения компонентов. Роторно-лопастные и планетарные (рис.1г,

д) смесители обеспечивают гибкость: первые — для сухих/полусухих смесей, вторые — для высокоточной гомогенизации многокомпонентных добавок.

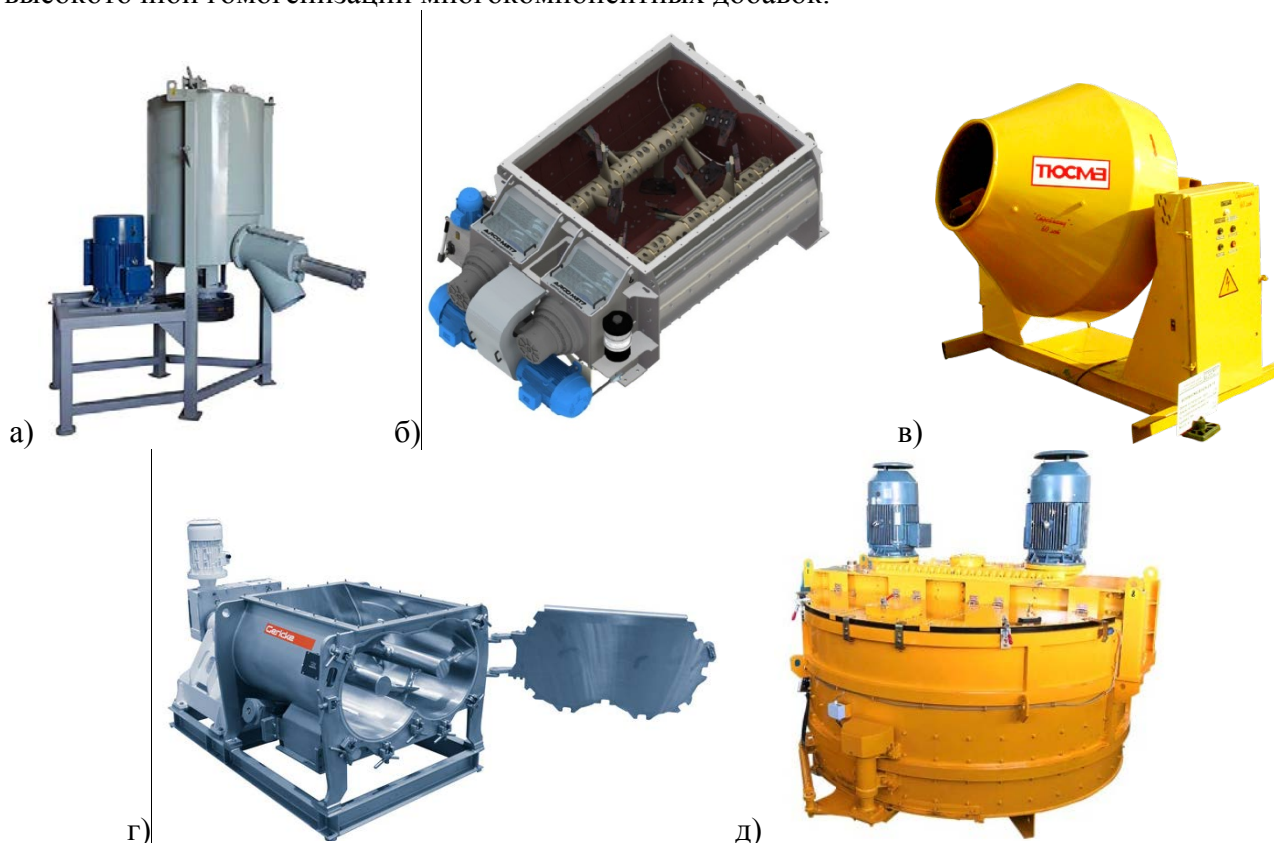


Рис. 1. Типы смесителей
 а- турбулентный; б- двухвальный; в- гравитационный;
 г- роторно-лопастной; д- планетарный

Автоматизация процессов дозирования и смешивания также играет ключевую роль. Современные системы на базе PLC-контроллеров позволяют точно соблюдать последовательность внесения компонентов, что критически важно для многокомпонентных добавок полифункционального действия (группа V). Например, при использовании воздухововлекающих добавок, которые увеличивают содержание микропузырьков воздуха, автоматизация помогает регулировать скорость перемешивания, предотвращая расслоение смеси. Кроме того, автоматические системы контролируют такие параметры, как влажность и температура, что особенно актуально при работе в условиях отрицательных температур, где требуется быстрое достижение критической прочности бетона.

Еще одним немало важным аспектом является оптимизация последовательности введения компонентов. На практике это означает, что сначала смешиваются вода и пластификаторы, затем добавляются цемент и минеральные наполнители, и только после этого вводятся заполнители и противоморозные добавки. Такой подход позволяет минимизировать негативное влияние отдельных компонентов.

Контроль качества перемешивания осуществляется через методы испытаний, регламентированные [5], включая анализ однородности распределения добавок и реологические тесты для измерения вязкости. Современные технологии позволяют отслеживать параметры смеси в реальном времени, а системы машинного обучения прогнозируют оптимальные режимы работы оборудования.

Сложности перемешивания цементных материалов требуют не только применения передового оборудования, но и полного понимания химии добавок, а также применение автоматизированных систем управления. Комбинирование этих подходов позволяет не

только решать текущие проблемы, но и создавать инновационные строительные материалы, отвечающие современным требованиям строительства.

Современное производство цементных бетонов и растворов невозможно представить без применения химических и минеральных модификаторов, которые не только улучшают технологические и эксплуатационные свойства материалов, но и способствуют решению экологических проблем за счет утилизации промышленных отходов. Использование органоминеральных добавок, сочетающих тонкодисперсные минеральные компоненты и пластифицирующие вещества, позволяет формировать оптимальную структуру цементного камня, повышая его прочность, долговечность и устойчивость к внешним воздействиям.

Ключевым фактором успешного внедрения таких добавок является выбор специализированного оборудования для смешивания. Разнообразие типов смесителей — от турбулентных до планетарных — обеспечивает гибкость в обработке материалов с разными реологическими свойствами. Автоматизация процессов дозирования и контроля параметров смеси (влажности, температуры, скорости перемешивания) минимизирует риски сегрегации, комкования и неравномерного распределения компонентов.

Оптимизация последовательности введения ингредиентов, применение современных систем управления на базе PLC-контроллеров и строгий контроль качества в соответствии с нормативными требованиями [5] позволяют создавать инновационные строительные материалы, отвечающие запросам современного строительства.

Таким образом, сочетание передовых технологий модификации, адаптированного оборудования и автоматизированных систем управления открывает новые возможности для производства высококачественных бетонов и растворов. Это не только повышает эффективность строительных процессов, но и способствует устойчивому развитию отрасли за счет снижения экологической нагрузки и рационального использования ресурсов.

Литература:

1. Шейнфельд А.В. Органоминеральные модификаторы как фактор, повышающий долговечность железобетонных конструкций // Бетон и железобетон. 2014. № 3. С. 16—21.
2. Королев, Е.В., Смирнов, В.А., Альбакасов, А.И., Иноземцев, А.С. Некоторые аспекты проектирования составов многокомпонентных композиционных материалов / Е.В. Королев, В.А. Смирнов, А.И. Альбакасов, А.С. Иноземцев // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. - 2011. - Т. 3. - № 6. - С. 32 – 43.
3. Кудяков, А.И., Аниканова, Л.А., Копаница, Н.О., Герасимов, А.В. Влияние зернового состава и вида наполнителей на свойства строительных растворов / А.И. Кудяков, Л.А. Аниканова, Н.О. Копаница, А.В. Герасимов // Строительные материалы. - 2001. - №11. - С. 28 – 29.
4. Шмитько, Е.И., Крылова, А.В., Белькова, Н.А., Рудаков, О.Б. Особенности структурообразования бетонов с модифицирующими добавками различных типов / Е.И. Шмитько, А.В. Крылова, Н.А. Белькова, О.Б. Рудаков // Бетон и железобетон. - 2013. - №2. - С. 5 – 7.
5. ГОСТ 24211-2008 Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 апреля 2010 г. № 70-ст: дата введения 2011-01-01.

Influence of mixer type on the distribution efficiency of admixtures in concrete

Portnyagina O.B.^{1a}, Portnyagina A.V.^{1b}

¹Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

^bportnyagina_1408@mail.ru

Keywords: cement mortars and concretes, additives, mixers

The article explores the prospects of using industrial waste as modifiers for cement-based concretes and mortars. It examines the impact of complex organo-mineral additives on the technological and performance properties of construction materials. Special attention is given to the selection of mixing equipment: the advantages and disadvantages of turbulent, twin-shaft, gravitational, rotor-paddle, and planetary mixers are analyzed. It is shown that automating batching and mixing processes optimizes the quality of concrete mixtures. The need to control mixture parameters at all production stages is substantiated. The study results demonstrate the feasibility of producing high-quality construction materials using industrial waste and advanced technologies.

УДК 69.002.51:621.225.2

Искусственный интеллект и машинное обучение в управлении строительной техникой

Жмуров В.В.^{1,a}, Кобзов А.Ю.^{1,b}, Жук Е.А.^{1,c}

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^avladimir_zhmyrov@mail.ru

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, автономные строительные машины, алгоритмы машинного обучения

Применение технологий искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) в строительной механизации позволяет снизить эксплуатационные затраты на 15–30% и повысить безопасность работ. В статье систематизированы ключевые направления внедрения ИИ, от Predictive Maintenance до автономных машин, а также выделены барьеры массовой адаптации (ограниченность данных, регуляторные риски).

Строительная отрасль активно внедряет современные технологии, включая искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение (МО). Эти технологии позволяют автоматизировать процессы, повысить безопасность и эффективность строительных машин, а также сократить издержки. В данной статье рассматриваются основные принципы ИИ и МО, их применение в строительной механизации, а также перспективы и ограничения внедрения.

ИИ представляет собой совокупность технологий, позволяющих компьютерам имитировать человеческие когнитивные функции, такие как распознавание образов, принятие решений и предсказательное моделирование. Машинное обучение является частью ИИ и включает в себя алгоритмы, которые обучаются на данных и делают прогнозы или принимают решения без прямого программирования.

Классификация ИИ-систем:

1. **Экспертные системы** – это базы знаний, в которых хранятся правила и логика принятия решений, основанные на знаниях экспертов. Они работают по принципу «если – то», применяя заранее запрограммированные алгоритмы для анализа входных данных и выдачи рекомендаций. Такие системы широко используются в диагностике, техническом обслуживании оборудования и принятии решений в сложных инженерных процессах. Недостатком экспертных систем является их ограниченность в обработке новых, ранее неизвестных данных, поскольку они не могут самостоятельно обучаться и адаптироваться.

2. **Алгоритмы машинного обучения** – это модели, которые обучаются на исторических данных, выявляя закономерности и шаблоны. В отличие от экспертных систем,

они не требуют явного программирования всех правил, а способны самостоятельно находить оптимальные решения. Машинное обучение делится на:

- о **Обучение с учителем** (Supervised Learning) – используется для прогнозирования и классификации данных, когда алгоритм обучается на размеченных примерах.

- о **Обучение без учителя** (Unsupervised Learning) – применяется для поиска скрытых закономерностей в данных, таких как кластеризация объектов или выявление аномалий.

- о **Обучение с подкреплением** (Reinforcement Learning) – подразумевает обучение модели через взаимодействие с окружающей средой и получение награды за правильные действия.

3. **Глубинное обучение** – это направление машинного обучения, основанное на использовании многослойных нейронных сетей, которые имитируют работу человеческого мозга. Глубинные нейросети способны анализировать сложные данные, такие как изображения, видео, аудиофайлы и неструктурированные тексты. Они используются в системах компьютерного зрения, распознавании речи, прогнозировании отказов оборудования и автономном управлении строительной техникой. Глубинное обучение требует значительных вычислительных ресурсов, но дает высокий уровень точности в решении сложных задач

Алгоритмы машинного обучения применяются в предсказательном анализе, оптимизации логистики, управлении строительной техникой и мониторинге оборудования.

Машинное обучение играет ключевую роль в предсказательном обслуживании строительной техники и оптимизации её работы. Оно позволяет анализировать большие массивы данных, поступающих от сенсоров, GPS и систем управления машинами, и выявлять закономерности, которые могут указывать на потенциальные проблемы или пути повышения эффективности.

Predictive Maintenance (предсказательное техобслуживание) – это стратегия, основанная на анализе данных с целью выявления ранних признаков неисправностей и их предотвращения. Датчики, установленные на строительной технике, собирают информацию о температуре, вибрации, нагрузке и других параметрах. Затем алгоритмы МО анализируют эти данные и предсказывают возможные отказы.

Примеры применения Predictive Maintenance:

- Использование вибрационных датчиков на экскаваторах и бульдозерах для раннего выявления износа подшипников и гидравлических систем.

- Мониторинг температуры двигателей и гидравлических жидкостей для предотвращения перегрева и сбоев.

- Анализ истории ремонтов и поломок для выявления слабых мест конструкции машин и их своевременного обслуживания.

Эффективность работы строительной техники напрямую влияет на расходы топлива и эксплуатационные затраты. МО может анализировать исторические данные о работе машин, учитывать рельеф местности, загруженность техники и другие факторы, чтобы предложить оптимальные режимы работы и провести оптимизацию расхода топлива и ресурсов на основе предыдущего опыта эксплуатации машин

Примеры:

- Разработка моделей прогнозирования расхода топлива в зависимости от типа выполняемых работ (например, копка грунта, перевозка грузов, укладка асфальта).

- Оптимизация параметров работы двигателей для снижения холостого хода и повышения КПД.

- Анализ погодных условий и состояния дорожного покрытия для выбора наиболее экономичных маршрутов передвижения техники.

Одной из ключевых задач в строительстве является логистика перемещения техники и материалов, **определение наиболее эффективных маршрутов передвижения машин на строительной площадке**. МО может анализировать планировку строительной площадки, учитывать наличие препятствий, интенсивность движения техники и предлагать наиболее эффективные маршруты.

Примеры решения задач:

- Использование GPS и датчиков в сочетании с МО для динамического определения маршрутов самосвалов, минимизирующих время простоя.
- Оптимизация движения кранов, экскаваторов и других машин для снижения времени выполнения операций.
- Предотвращение заторов и конфликтов маршрутов за счёт прогнозирования пиковых нагрузок на строительной площадке.

Искусственный интеллект находит применение в строительной механизации благодаря своей способности анализировать большие объёмы данных и адаптироваться к изменяющимся условиям.

Автономные строительные машины – это техника, способная выполнять строительные работы без непосредственного участия оператора. Они используют различные технологии, включая сенсоры, камеры, GPS-навигацию и алгоритмы машинного обучения, чтобы анализировать окружающую среду и принимать решения в реальном времени.

Принципы работы автономных строительных машин:

- Системы компьютерного зрения: оснащены камерами и лидаром, позволяющими строить 3D-карту местности, идентифицировать препятствия и анализировать рабочее пространство.
- Сенсоры и датчики: измеряют скорость, нагрузку, давление, температуру и другие параметры для автоматической корректировки работы.
- Алгоритмы машинного обучения: используют накопленные данные для предсказания оптимального маршрута, распознавания объектов и предотвращения столкновений.
- GPS и SLAM (Simultaneous Localization and Mapping): обеспечивают точное позиционирование и позволяют автономной машине строить карту окружающей среды в реальном времени.
- Системы удаленного мониторинга и управления: позволяют операторам отслеживать работу техники и при необходимости вмешиваться в процесс.

Некоторые типы внедренных автономных строительных машин

- **Автономные экскаваторы:** используют компьютерное зрение и ИИ для автоматического рытья траншей с минимальным участием человека. Пример – экскаваторы от Built Robotics.
- **Роботизированные бульдозеры:** управляются ИИ для автоматической планировки земельных участков. Komatsu и Caterpillar уже применяют такие системы.
- **Автоматизированные краны:** способны самостоятельно определять точки подъема и размещения грузов, повышая точность и безопасность работы.
- **Беспилотные самосвалы:** используются в горнодобывающей промышленности и на крупных стройках для перевозки материалов без участия водителя (например, самосвалы Caterpillar Autonomous Haulage System).

Многие крупные строительные компании и производители спецтехники уже успешно применяют технологии искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) в своей продукции, улучшая автоматизацию, безопасность и эффективность строительных процессов.

- **Caterpillar** – один из лидеров в области автономной строительной техники. Компания разработала систему для карьерных самосвалов, способных передвигаться и

работать без участия водителя. Их автономные машины используют датчики, GPS и алгоритмы МО для оптимизации маршрутов, предотвращения столкновений и повышения эффективности перевозок.

- **Komatsu** – реализует концепцию «**Smart Construction**», которая включает в себя использование дронов, ИИ-аналитики и автономных машин для оптимизации строительных работ. Например, их умные бульдозеры и экскаваторы могут автоматически планировать и выполнять задачи, минимизируя ошибки и затраты.

- **Boston Dynamics** – компания, известная своими роботами, адаптировала **робота Spot** для мониторинга строительных площадок. Оснащенный камерами и сенсорами, он способен проводить инспекции, выявлять отклонения от плана строительства и передавать данные в реальном времени, что повышает точность контроля и снижает риски.

Развитие искусственного интеллекта (ИИ) в строительной механизации обещает значительные изменения в отрасли, повышая уровень автоматизации, эффективности и точности выполнения работ. Среди ключевых направлений развития можно выделить:

- **Более широкое применение беспилотных машин** – строительная техника, управляемая ИИ, сможет выполнять задачи с минимальным участием человека. Это включает в себя автономные экскаваторы, самосвалы и краны, которые будут взаимодействовать друг с другом, автоматически корректируя работу в зависимости от текущей ситуации на стройплощадке.

- **Интеграция ИИ с BIM (Building Information Modeling)** – сочетание искусственного интеллекта с технологиями информационного моделирования зданий позволит оптимизировать управление строительными процессами. ИИ сможет анализировать 3D-модели зданий, прогнозировать возможные проблемы на ранних этапах и предлагать наиболее эффективные решения по размещению техники, логистике и использованию материалов.

- **Использование нейросетей для прогнозирования сроков строительства и оптимизации графиков работ** – машинное обучение поможет анализировать исторические данные о проектах, учитывать погодные условия, доступность ресурсов и эффективность работы техники для составления более точных и адаптивных графиков. Это позволит минимизировать задержки и оптимизировать использование рабочей силы.

В перспективе искусственный интеллект приведёт к созданию полностью автоматизированных строительных площадок, где техника, датчики и системы управления будут работать в единой экосистеме, обеспечивая максимальную производительность и минимальные потери.

Искусственный интеллект и машинное обучение становятся важными инструментами в управлении строительной техникой. Они позволяют повышать производительность, снижать затраты и улучшать безопасность строительных работ. Однако для успешного внедрения необходимо преодолеть технические и экономические барьеры, включая адаптацию законодательства и развитие инфраструктуры. Несмотря на эти вызовы, будущее строительной механизации, основанной на ИИ, выглядит многообещающе.

Литература:

1. Zhang, L. Deep learning-based predictive maintenance for construction equipment using multi-sensor data. *Automation in Construction*, 145, 104657 (2023).
2. Kim, H. Autonomous bulldozer control using reinforcement learning in dynamic environments. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(3), (2022).
3. Cheng, J.C.P. Digital twin and artificial intelligence for construction equipment monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(4), (2021)/
4. Wang, Q. Vision-based obstacle detection for autonomous construction vehicles: A YOLOv7 and LiDAR fusion approach. *Robotics and Autonomous Systems*, 159, (2023).

5. Delgado, J.M.D. Artificial intelligence in the construction industry: A review of predictive maintenance applications. *Advanced Engineering Informatics*, 45, (2020).
6. Caterpillar Inc. (2022). White Paper: Autonomous Haulage Systems: Performance Metrics and ROI Analysis.
7. Komatsu (2021). Technical Report: Smart Construction: AI-Driven Site Optimization.
8. Bock, T., Linner, T. *Robot-Oriented Design for Autonomous Construction Equipment*. Cambridge University Press. (2020)

Artificial intelligence and machine learning in construction machinery management

Zhmurov V.V.^{1,a}, Kobzov A.Yu.^{1,d}, Zhuk E.A.^{1,c}

¹Bratsky State University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia

^avladimir_zhmyrov@mail.ru

Keywords: artificial intelligence, machine learning, autonomous construction machines, machine learning algorithms.

The use of artificial intelligence (AI) and machine learning (MO) technologies in construction mechanization makes it possible to reduce operating costs by 15-30% and increase work safety. The article systematizes the key areas of AI implementation, from Predictive Maintenance to autonomous machines, and highlights barriers to mass adaptation (limited data, regulatory risks).

УДК 69.002.51:621.225.2

Возможные пути модернизации гидросистем с длинноходовыми гидроцилиндрами

Жмуров В.В.^{1,a}, Герасимов С.В.^{1,b}, Кобзов А.Ю.^{1,c}, Синицын С.А.^{1,d},
Жук Е.А.^{1,e}, Томилов С.А.^{1,f}, Брагин С.Н.^{1,g}, Аскеров Р.Т.^{1,h}

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^avladimir_zhmyrov@mail.ru

Ключевые слова: гидросистема, гидроцилиндр, деформация, поддержка, диагностика, несущая способность, прогиб.

Повышение мощностей машин связано с повышением уровня давления рабочей жидкости в гидросистемах машин и увеличение основных размеров их гидроагрегатов, в частности, гидроцилиндров их рабочего оборудования, к числу которых надо отнести ход штока гидроцилиндра, его линейные и диаметральные размеры, а, следовательно, и массу. Анализ надёжности машин в эксплуатации показал, что отказы элементов гидравлического привода составляют половину от общего количества всех отказов по машине. При этом в гидроприводе максимальный процент отказов приходится на долю гидроцилиндров. В процессе эксплуатации гидроцилиндр возвратно-поступательного перемещения двустороннего действия с односторонним штоком в результате его функционального продольно-поперечного нагружения деформируется в вертикальной продольной плоскости с появлением у него полного прогиба, который резко увеличивает действующие на него изгибающие нагрузки, а также реакции, возникающие в его подвижных герметизируемых

сопряжениях. Последние резко интенсифицируют процесс изнашивания трущихся элементов. Не исключена вероятность искривления штока и заклинивания его в корпусе и, вообще, создание неработоспособного гидроцилиндра.

Существующие конструкции гидроцилиндров возвратно-поступательного перемещения двухстороннего действия с односторонним штоком содержат корпус с крышками, поршень с направляющими элементами, шток и уплотняющее устройство штока, установленное на крышке с направляющей втулкой [1-5].

Основным недостатком названного устройства является то, что до приложения продольного сжимающего усилия, то есть рабочего толкающего усилия гидроцилиндра он имеет прогиб, определяемый как сумма прогиба в результате несоосности его основных элементов (штока и гильзы), обусловленного наличием зазоров в его сопряжениях «поршень – гильза», «шток – направляющая втулка», прогиба в результате наличия возможного начального (технологического) искривления его элементов (штока и корпуса), регламентируемого технологическим допуском на непрямолинейность изготовления длинномерных деталей, а также прогиба от действия поперечных сил – весов этих элементов [4, 6-8].

В процессе функционирования, как правило, наклонно расположенный гидроцилиндр подвержен продольно-поперечному изгибу и не является устойчивым. При этом предельная величина продольного сжимающего усилия значительно меньше предельного сжимающего усилия устойчивого стержня, из чего следует, что стержень, имеющий начальное искривление, в нашем случае силовой гидроцилиндр, более подвержен изгибу и возникновению в сечениях его элементов остаточных, пластических деформаций, нежели прямолинейный, расположенный вертикально, то есть с позиций прочности, обладает меньшей надежностью [9].

После приложения продольного сжимающего усилия, то есть при подачи под давлением жидкости в поршневую полость гидроцилиндра, полная деформация гидроцилиндра увеличивается [4, 6, 8, 9-16] и, будучи плечом приложения этого усилия, приводит к возрастанию полного изгибающего момента, могущего вызвать критические напряжения и, соответственно, появление пластических деформаций у штока гидроцилиндра и последующей потере гидроцилиндром работоспособности в результате заклинивания штока с поршнем в корпусе (гильзе) гидроцилиндра [1, 4, 9].

Продольное сжимающее усилие, как правило, непостоянно на протяжении рабочего цикла строительной машины, например, одноковшового экскаватора, и в данном случае, является функцией сопротивления копанью грунта [9, 10]. Это усилие может скачкообразно меняться по мере увеличения этого сопротивления, например, при соприкосновении движущегося ковша экскаватора с непреодолимым препятствием (скала, валун и т.д.).

Одновременно, такое функциональное расположение силового гидроцилиндра под нагрузкой приводит к увеличению реакций в его подвижных герметизируемых сопряжениях, что значительно ухудшает условия работы элементов этих сопряжений, повышает в них температуру и увеличивает интенсивность изнашивания [3, 9, 10, 17-19].

По мере изнашивания трущихся поверхностей элементов гидроцилиндра, приводящего опять-таки к увеличению его полной деформации, соответственно, к увеличению действующих продольных и поперечных нагрузок, условия функционирования гидроцилиндра ухудшаются с большей интенсивностью [20], следствием чего является снижение его надежности и ресурса работоспособности, как по несущей, так и по герметизирующей способности [21].

Перечисленные недостатки традиционной конструкции гидроцилиндра могут быть устранены, в частности, путем приведения гидроцилиндра из состояния продольно-

поперечного изгиба в состояние устойчивости или близком к таковому через поддержку корпуса (гильзы) гидроцилиндра промежуточной опорой [18].

Известный [22] длинноходовой гидроцилиндр содержит корпус с двумя, с задним и передним элементами крепления. Применение жесткого крепления корпуса гидроцилиндра позволяет несколько увеличить рабочий ход штока за счет повышения общей жесткости системы. Однако данная конструкция требует соблюдения строгой соосности всех трех опор крепления корпуса и штока гидроцилиндра, что усложняет его конструкцию. Кроме этого, использование неподвижного промежуточного поддерживающего элемента крепления корпуса гидроцилиндра не устраняет больших реакций в элементах сопряжений «поршень – корпус» и «шток – направляющая втулка», являющихся результатом собственной деформации длинномерного штока под действием продольного сжимающего усилия. При этом в случае резкого изменения усилия на штоке гидроцилиндра последний не имеет возможности занять устойчивое положение вследствие неподвижности переднего элемента крепления корпуса.

Известный из патента РФ №2442028 гидроцилиндр, содержащий корпус с проушиной и двумя промежуточными поддерживающими опорами, имеет шток с проушиной и подвижной промежуточной опорой. Понятно, что конструкция с пятью опорами требует соблюдения еще более строгой соосности всех опор крепления элементов гидроцилиндра, что также усложняет его конструкцию.

Однако основной недостаток перечисленных инженерных решений заключается в невозможности применения подобных гидроцилиндров в конструкции технических объектов, работа которых сопровождается изменением пространственного расположения гидроцилиндра относительно элементов рабочего оборудования, например в приводе рабочего оборудования одноковшового экскаватора, гидроцилиндры которого совершают угловые перемещения относительно проушины корпуса.

Названный существенный недостаток устраняется, например, в гидроприводе, предложенном в авторском свидетельстве СССР №1191534, в котором с целью поддержки силового гидроцилиндра дополнительно установлен вспомогательный гидроцилиндр, выполняющий роль поддерживающей опоры его корпуса.

Основным недостатком известного аналога является его низкая надежность в результате ориентации при выборе кинематической схемы поддержки гидроцилиндра вспомогательным на изгибающий момент, а не на линейное сосредоточенное усилие, направленного поперек оси силового цилиндра. Следствием этого является возможный S-образный перегиб последнего, приводящий к изгибу штока, росту реакции в трущихся сопряжениях силового гидроцилиндра, обрыву опорных проушин его штока и корпуса, а также вызывающий значительные знакопеременные напряжения изгиба в консольном элементе кинематической связи силового цилиндра со вспомогательным.

Кроме того, гидросвязь последнего с цилиндром управления посредством использования трубопровода, значительной длины и возможно повышенных гидравлических соединений, снижает его быстродействие по сравнению с силовым цилиндром. В результате этого последний включается, нагружается и деформируется раньше, нежели создается и прикладывается к нему усилие поддержки вспомогательным цилиндром.

Названный недостаток устраняется в известной из авторского свидетельства СССР №1386758 гидросистеме, в которой используется вспомогательный гидроцилиндр, шарнирно соединенный с силовым и развивающий переменное по величине линейное сосредоточенное поддерживающее усилие, чем обеспечивается следящее поддерживающее усилие силового цилиндра при свободном изменении им своего пространственного расположения. (Рис. 1).

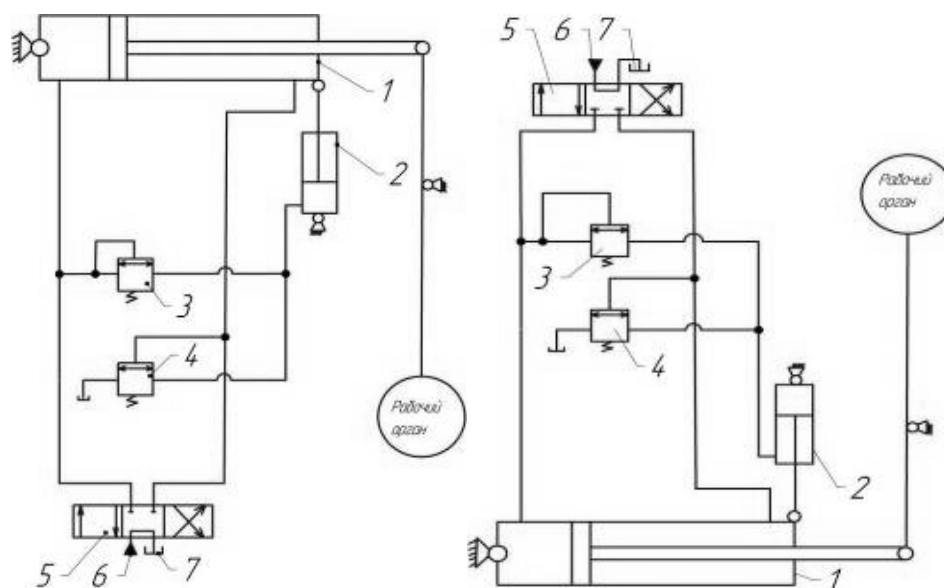


Рис. 1. Принципиальная гидросистема поддержки силового гидроцилиндра вспомогательным снизу и сверху

1 – силовой гидроцилиндр; 2 – вспомогательный гидроцилиндр; 3 – напорный клапан, 4 – предохранительный клапан; 5 – гидрораспределитель; 6 – источник питания; 7 – слив

Основным недостатком названного прототипа является наличие дополнительной гидролинии, соединяющей полость вспомогательного цилиндра через клапан давления со сливом, в результате чего увеличивается общее число гидролиний, связывающих гидросистему привода силового гидроцилиндра с источником питания и сливом с двух до трех. Этот недостаток еще более проявляется на одноковшовых гидрофицированных машинах (одноковшовый экскаватор, фронтальный погрузчик, лесные манипуляторы и др.), содержащих несколько последовательно расположенных гидроцилиндров (гидроцилиндры стрелы, рукояти и ковша). Так, после ковша число гидролиний становится – три, после рукояти – шесть, после стрелы – девять. Вместо двух, четырех и шести, соответственно. Как следствие усложнение конструкции гидросистемы, повышение ее материалоемкости.

Кроме того, наличие гидролинии значительной длины способствует повышению давления слива в полости вспомогательного гидроцилиндра из-за возросшего гидравлического сопротивления, особенно при низких температурах окружающего воздуха и повышения вязкости рабочей жидкости. При этом давление слива должно стремиться к нулю. В противном случае на штоке вспомогательного цилиндра создается усилие поддержки силового цилиндра, когда таковое не желательно, так как последний работает на растяжение и не прогибается. Как следствие снижение надежности гидросистемы.

Перечисленные недостатки устраняются путем подключения клапана, соединенного с полостью вспомогательного цилиндра, к поршневой полости силового (Рис. 2).

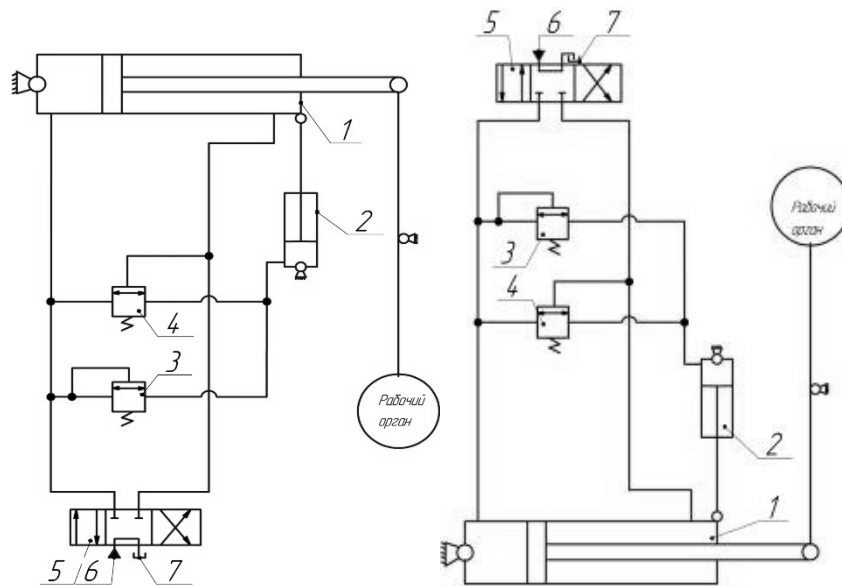


Рис. 2. Принципиальная гидросистема поддержки силового гидроцилиндра вспомогательным снизу и сверху:

1 – силовой гидроцилиндр; 2 – вспомогательный гидроцилиндр; 3 – напорный клапан, 4 – предохранительный клапан; 5 – гидрораспределитель; 6 – источник питания; 7 – слив

При подаче рабочей жидкости в штоковую полость цилиндра 1, не требующий из-за его растяжения поддержки вспомогательным цилиндром 2, жидкость из его штоковой полости включает клапан давления 4, соединяя полость цилиндра 2 с поршневой полостью силового 1, уже соединенной со сливом 7. Вытесняемая движущимся поршнем жидкость из поршневой полости силового цилиндра 1 через распределитель 5 также поступает на слив 7. При этом в случае возможных угловых перемещений цилиндра 1, например, в треугольной схеме привода рабочего органа, шток вспомогательного цилиндра 2 совершает как выдвижение, так и обратный ход. В этом случае гидролиния, соединяющая полость последнего с поршневой полостью силового цилиндра 1, исполняет роль слива минимальной длины с минимальными гидравлическими сопротивлениями. У прототипа же возможное всасывание жидкости происходит непосредственно из слива 7 (как правило, из гидробака машины) по длинным сочлененным (металлические трубопроводы и гибкие шланги высокого давления) гидролиниям со значительными гидравлическими сопротивлениями, что нежелательно и снижает надежность гидросистемы и машины в целом.

Таким образом, в заявляемой гидросистеме достигается повышение надежности, упрощение конструкции гидросистемы и снижение ее материалоемкости.

Основным недостатком гидросистем (Рис. 1, 2) является их низкая надежность вследствие возможного рассогласования требуемого поддерживающего усилия на штоке вспомогательного цилиндра для приведения силового из состояния продольно-поперечного изгиба в положение продольной устойчивости и развиваемого в действительности вспомогательным цилиндром. Это наиболее вероятно при изменении угла наклона к горизонту силового гидроцилиндра, сопровождающееся изменением величины поперечных нагрузок, и незначительно сопряжено с перемещением его штока, влияющим на значение прогиба силового цилиндра. Усилие на штоке вспомогательного цилиндра, полость которого соединена через предохранительный клапан с поршневой полостью силового цилиндра, является результатом лишь развиваемого в нем давления жидкости в процессе функционирования без учета пространственного расположения силового цилиндра. Последнее же, увеличивая или снижая поперечные нагрузки, влияет на величину необходимого усилия на штоке вспомогательного цилиндра.

Кроме этого недостатком известных гидросистем является их низкая надежность вследствие возможного первоочередного включения силового гидроцилиндра, а не поддерживающего его вспомогательного. Это объясняется более высоким гидравлическим сопротивлением и значительной длинной линии питания вспомогательного цилиндра по сравнению с силовым.

Перечисленные недостатки устраняются путем установки параллельно соединенных, разнонаправленных напорного и обратного клапанов между предохранительными клапанами и поршневой полостью силового цилиндра и между клапанами давления и его штоковой полостью.

По аналогии с известными эта гидросистема содержит силовой и вспомогательный гидроцилиндры, предохранительный клапан и клапан давления. Поршневая и штоковая полости силового цилиндра подключены через распределитель к источнику питания и сливу, а вспомогательный цилиндр, шток которого кинематически связан с корпусом силового, выполнен однопольстным, полость которого подключена к выходу предохранительного клапана, сообщенного входом с поршневой полостью силового цилиндра, и ко входу клапана, полость гидроуправления которого сообщена со штоковой полостью силового цилиндра.

В отличие от известных гидросистем с целью устранения вышеприведенных недостатков снабжена параллельно соединенными, разнонаправленными напорными и обратными клапанами, установленными между предохранительными клапанами и поршневой полостью силового цилиндра и между клапанами давления и его штоковой полостью. Кроме того, клапан давления и предохранительный клапан настраиваются на давление срабатывания, меньше аналогичного для клапанов.

Таким образом, вследствие произведенных дополнений и изменений гидросопротивлений линий питания силового цилиндра становится больше гидросопротивления линии питания вспомогательного цилиндра.

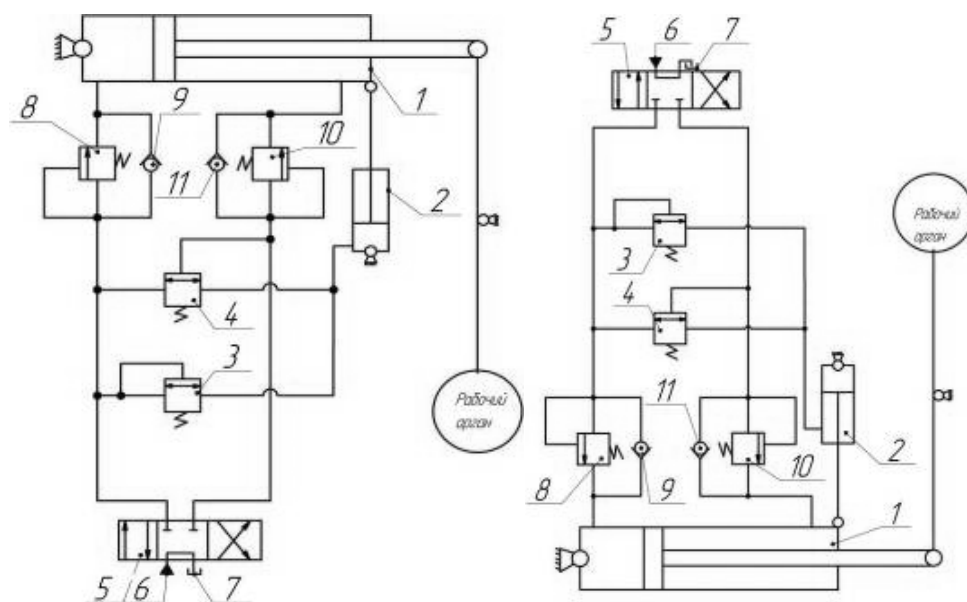


Рис. 3. Принципиальная гидросистема поддержки силового гидроцилиндра вспомогательным снизу и сверху

- 1 – силовой гидроцилиндр; 2 – вспомогательный гидроцилиндр; 3 – напорный клапан,
4 – предохранительный клапан; 5 – гидрораспределитель; 6 – источник питания;
7 – слив; 8, 10 – напорный клапан; 9, 11 – обратный клапан

При подаче жидкости в поршневую полость силового гидроцилиндра 1 (Рис. 2), что приводит к его продольно-поперечному нагружению и вызывает максимальный прогиб, вследствие срабатывания предохранительного клапана 3 включается в действие вспомогательный гидроцилиндр 2, выполняющий роль сенсорной по нагрузке поддерживающей опоры силового цилиндра 1. Давление срабатывания клапана 3, выбранное из условия обеспечения цилиндром 2 приведения цилиндра 1 в устойчивое положение, позволяет цилиндру 2 компенсировать все возможные, а также накопленные за период простоя прогибы гидроцилиндра 1, включая и те, что произошли из-за внутренних перетечек рабочей жидкости через уплотнения гидроцилиндра 2. Вытесняемая движущимся поршнем из штоковой полости цилиндра 1 жидкость поступает через распределитель 5 на слив 7. Эксплуатационное колебание нагрузки на штоке гидроцилиндра 1 через давление жидкости в его поршневой полости и полости вспомогательного цилиндра 2, связанной с первой, отражается на величине требуемого толкающего, тянущего поддерживающего усилия на его штоке, чем достигается сенсорное по нагрузке действие вспомогательного цилиндра 2.

При подаче жидкости в поршневую полость силового гидроцилиндра 1 (Рис. 3), что приводит к его продольно-поперечному нагружению и вызывает максимальные поперечные деформации в виде прогиба, вследствие разности давления срабатывания предохранительного клапана 3 и напорного 8, первый, открывшись, включает в действие вспомогательный гидроцилиндр 2, выполняющий роль сенсорной по нагрузке поддерживающей опоры силового цилиндра 1. Давление срабатывания клапана 3, выбранное из условия обеспечения цилиндром 2 приведения 1 в устойчивое положение, позволяет цилиндру 2 компенсировать все возможные, а также накопленные за период простоя прогибы гидроцилиндра 1, включая и те, что произошли из-за внутренних перетечек рабочей жидкости через уплотнения гидроцилиндра 2. Вслед за этим открывается напорный клапан 8, включая в работу силовой цилиндр 1, уже находящийся, благодаря действию цилиндра 2, в устойчивом положении. Вытесняемая движущимся поршнем из штоковой полости цилиндра 1 жидкость через обратный клапан 11 поступает далее через распределитель 5 на слив 7. Эксплуатационное колебание нагрузки на штоке гидроцилиндра 1 через давление жидкости в его поршневой полости и полости, вспомогательного цилиндра 2, связанной с первой, отражается на величине требуемого толкающего, тянущего поддерживающего усилия на него штоке, чем достигается сенсорное по нагрузке действие гидроцилиндра 2.

При подаче через распределитель 5 рабочей жидкости в штоковую полость цилиндра 1, не требующей вследствие растяжения последнего его поддержки вспомогательным 2, сначала в результате разности давления срабатывания клапана давления 4 и напорного клапана 10, открывается клапан 4, соединяя со сливом 7 полость цилиндра 2, а затем – клапан 10, включающий в действие уже разгруженный от нежелательного в этом случае воздействия вспомогательного 2 гидроцилиндр 1. Вытесняемая движущимся поршнем жидкость из поршневой полости силового цилиндра 1 через обратный клапан 9 поступает далее через распределитель 5 на слив 7. При этом в случае возможных кинематически обусловленных угловых перемещений цилиндра 1 со стороны вспомогательного 2 в результате связи его полости через клапан 4 со сливом, постоянно заполненным рабочей жидкостью, вытесняемой из поршневой полости цилиндра 1, не действуют никакие дополнительные сопротивления, например, из-за всасывания жидкости непосредственно из слива 7 (как правило, из гидробака машины), что не желательно.

Таким образом, использование этой гидросистемы, обеспечивающей быстрое действие вспомогательного цилиндра по отношению к силовому без использования каких-либо дополнительных элементов электроуправления и источников питания, позволяет повысить надежность гидрофицированной машины в целом.

Литература:

1. Кобзов Д.Ю. Гидроцилиндры дорожных и строительных машин. Часть 1. Конструкция. Надёжность. Перспективы развития // Братск. индустр. ин-т. - Братск, 1998. – 59 с., ил., библиогр. 246 назв. – Рус. – Деп. в МАШИР 13.08.1998, № 2-сд1998.
2. Кобзов Д.Ю., Плешивцева С.В., Жмуров В.В. Анализ конструкции и перспективы развития гидропривода возвратно-поступательного действия // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Научный журнал ИрГУПС, Иркутск. 2007. №4 (16). С. 39-44.
3. Кобзов Д.Ю. О надёжности и работоспособности гидроцилиндров повышенного типоразмера // Вестник Таджикского технического университета. Душанбе, 2012. №4 (20). С. 30-39.
4. Кобзов Д.Ю., Усова С.В. Экспресс-диагностика несущей способности гидроцилиндров машин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Научный журнал ИрГУПС, Иркутск, 2009. №3 (23). С. 174-179.
5. Кобзов Д.Ю., Ереско С.П., Кулаков А.Ю., Липецкий В.И., Лханаг Д. Бортовая диагностика несущей способности гидроцилиндров машин // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. - №2 (71). Выпуск 2. С. 62-67.
6. Лапшин В.Л., Тарасов В.А., Жмуров В.В. Гидроцилиндры дорожных и строительных машин. Часть 3. Несущая способность. // Братск. гос. ун-т. – Братск, 2011. - 88 с., ил., библиогр. 93 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ РАН 27.01.2011, № 27-B2011.
7. Кобзов Д.Ю., Кобзов А.Ю., Жмуров В.В. О расчёте экономической эффективности модернизации гидроцилиндров ДСМ // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Научный журнал ИрГУПС, Иркутск, 2008. №3 (19). С. 26-30.
8. Кобзов Д.Ю., Жмуров В.В., Кобзова И.О., Лханаг Д. К расчёту продольного прогиба гидроцилиндра // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Научный журнал ИрГУПС, Иркутск, 2010. №4 (28). 2010. С. 64-69.
9. Кобзов Д.Ю. Диагностирование гидроцилиндров рабочего оборудования одноковшовых строительных экскаваторов: Дисс. ... к.т.н. / ЛИСИ, Л., 1987. – 345 с.
10. Д.Ю. Кобзов, В.А.Тарасов, А.А. Трофимов. Гидроцилиндры дорожных и строительных машин. Часть 2. Условия эксплуатации, рабочий процесс, режим работы и параметры нагружения // Братск. гос. техн. ун-т. – Братск, 1999. – 108 с., ил., библиогр. 179 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 01.12.1999, № 3552-B1999.
11. Кобзов Д.Ю., Жмуров В.В. Гидроцилиндры одноковшовых гидрофицированных машин. // Братск. гос. ун-т. – Братск, 2010. – 105 с., ил., библиогр. 80 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 17.05.2010, №288-B2010.
12. Кобзов Д.Ю., Жмуров В.В., Плешивцева С.В. Совершенствование конструкции привода ковша одноковшовых гидрофицированных дорожных и строительных машин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Научный журнал ИрГУПС, Иркутск, 2007. №3 (15). С. 40-46.
13. Кобзов Д.Ю., Лханаг Д., Дэлэг Д., Тарасов В.А. Выбор оптимальных форм штока гидроцилиндра // Научный вестник НГТУ, Новосибирск, 2007. №4 (29). С. 191-195.
14. Кобзов Д.Ю., Дэлэг Д., Жмуров В.В., Лханаг Д. Модернизация конструкции опор гидроцилиндра привода ковша одноковшовых гидрофицированных дорожных и строительных машин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Научный журнал ИрГУПС, Иркутск, 2008. №1 (17). 2008. С. 28-33.
15. Кобзов Д.Ю., Ереско С.П. Методика определения эксцентриситета в опорах крепления гидроцилиндра // Горное оборудование и электромеханика. Научно-аналитический и производственный журнал. Изд-во «Новые технологии». М., 2009. №3. С. 38-43.
16. Кобзов Д.Ю., Ереско С.П., Жмуров В.В., Кобзова И.О., Лханаг Д. О механизме образования эксцентриситета в опорах гидроцилиндра // Вестник Таджикского технического университета. Душанбе, 2012. №3 (19). С. 77-78.
17. Кобзов Д.Ю., Кобзов А.Ю., Лханаг Д. О потерях на трение в гидроцилиндрах машин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Научный журнал ИрГУПС, Иркутск, 2009. №2 (22). С. 47-50.
18. Кобзов Д.Ю., Ереско С.П., Жмуров В.В. Гидроцилиндры дорожных и строительных машин. Часть 6. Работоспособность. Надёжность. Варианты модернизации. // Братск. гос. ун-т. –

Братск, 2012. – 43 с.: ил., библиогр. – 78 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ РАН, 27.04.2012, № 198-B2012.

19. Кобзов Д.Ю., Кобзова И.О., Лханаг Д. Расчёт направляющих качения гидроцилиндра // Системы. Методы. Технологии. Научный журнал БрГУ, Братск. - №3 (11). С. 35-40.

20. Кобзов Д.Ю., Лханаг Д., Дэлэг Д. Dialectical approach to the insight into engineering objects evolution // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Научный журнал ИрГУПС, Иркутск, 2008. №1 (17). С. 93-99.

21. Сергеев А.П., Кобзов Д.Ю., Лханаг Д. Гидроцилиндры дорожных и строительных машин. Часть 4. Герметизирующая способность. // Братск. гос. техн. ун-т. – Братск, 2003. – 44 с., ил., библиогр. 116 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 14.07.2003, № 1376-B2003.

22. Ji Yun Tian. Техническое обслуживание и ремонт гидрообъёмного привода.- Пекин: Машиностроение, 1988. С. 102-124.

Possible ways to modernize hydraulic systems with long-stroke hydraulic cylinders

Zhmurov V.V.^{1,a}, Gerasimov S.V.^{1,b}, Kobzov A.Yu.^{1,c}, Sinitsyn S.A.^{1,d}, Zhuk E.A.^{1,e}, Tomilov S.A.^{1,f}, Bragin S.N.^{1,g}, Askerov R.T.^{1,h}

¹Bratsky State University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia

^avladimir_zhmyrov@mail.ru

Keywords: hydraulic system, hydraulic cylinder, deformation, support, diagnostics, bearing capacity, deflection

An increase in the capacity of machines is associated with an increase in the pressure level of the working fluid in the hydraulic systems of machines and an increase in the basic dimensions of their hydraulic units, in particular, the hydraulic cylinders of their working equipment, which include the stroke of the hydraulic cylinder rod, its linear and diametrical dimensions, and, consequently, the weight. An analysis of the reliability of the machines in operation showed that failures of hydraulic drive elements account for half of the total number of all failures on the machine. At the same time, hydraulic cylinders account for the maximum failure rate in the hydraulic drive. During operation, a two-way reciprocating hydraulic cylinder with a one-sided rod, as a result of its functional longitudinal and transverse loading, deforms in the vertical longitudinal plane with the appearance of a complete deflection, which dramatically increases the bending loads acting on it, as well as reactions occurring in its movable sealed interfaces. The latter dramatically intensify the wear process of the friction elements. The possibility of bending the rod and jamming it in the housing and, in general, creating an inoperable hydraulic cylinder is not excluded.

УДК 62-7

Стенд для диагностирования гидроцилиндров

Герасимов С.В.^{1,a}, Кобзов А.Ю.^{1,b}, Синицын С.А.^{1,c}, Жук Е.А.^{1,d}, Томилов С.А.^{1,e}

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^acareer@mail.ru, ^belisavetasnaaya@gmail.com

Ключевые слова: гидроцилиндр, деформация, диагностика, рабочие скорости, ход штока

Настоящая работа посвящена описанию процесса диагностирования гидроцилиндров рабочего оборудования ДСМ и разработке стенда для испытаний и диагностирования гидроцилиндров.

Создание новых экономичных и высокопроизводительных машин практически невозможно без применения гидравлического привода [1, 2]. Наличие у гидропривода целого ряда преимуществ перед другими типами приводов [3, 4] что в свою очередь способствует его широкому применению в нашей стране и за рубежом [5, 6]. Но, отмеченные преимущества машин с гидроприводом реализуются только при строгом соблюдении всех требований к их эксплуатации и обслуживанию [7].

Современные средства испытаний и диагностирования гидроцилиндров дорожных и строительных машин и, в частности, одноковшовых строительных экскаваторов не позволяют учесть всех факторов, влияющих на состояние испытуемых гидроцилиндра и их элементов: циклически изменяющиеся нагрузки, скорости перемещения поршня, углы, определяющие пространственное положение гидроцилиндра и значения контактных давлений в подвижных сопряжениях.

В результате исследований был проведен анализ стендов для ресурсных испытаний и диагностирования гидроцилиндров.

В целом, при всем разнообразии предлагаемых методов и реализующих их устройств, стенды для испытаний и диагностирования гидроцилиндров можно разделить на несколько типов [5, 6].

Статического действия (опрессовка). Характеризуются простотой конструкции, но не позволяют учесть зависимость параметров испытуемых элементов гидроцилиндра от его пространственного положения и хода штока (неравномерный износ уплотнителей, изгиб штока, наличие задиров на штоке и т.п.).

Возвратно-поступательного действия. Работают как в режиме опрессовки, так и при вдвигании-выдвигании штока, что позволяет проводить циклические испытания. Не учитывают изменение пространственного положения гидроцилиндра в реальных условиях эксплуатации.

Динамические возвратно-поступательного действия. Имеют возможность изменять нагрузку на испытуемый гидроцилиндр в течении цикла, что позволяет проводить испытания, имитируя динамический характер изменения нагрузки в условиях реальной эксплуатации. Не учитывают изменение пространственного положения гидроцилиндра в реальных условиях эксплуатации.

Динамические возвратно-поступательного действия с возможностью создания угла перекоса гильза-шток для учета технологических и эксплуатационных зазоров. Кроме того, позволяет учесть искривление штока, вызванное остаточными деформациями, полученными в процессе эксплуатации. Не учитывают изменение пространственного положения гидроцилиндра в реальных условиях эксплуатации.

Динамические возвратно-поступательного действия с возможностью изменения угла пространственного положения гидроцилиндра в процессе цикла испытаний (Рис.1). Данные конструкции стендов позволяют проводить испытание и диагностирования в условиях, близких к эксплуатационным, но в небольшом диапазоне изменения угла пространственного положения гидроцилиндра, что существенно сужает их универсальность и не позволяет проводить испытания гидроцилиндров работающих в широком диапазоне изменения угла положения, например, гидроцилиндров привода ковша одноковшовых строительных экскаваторов, гидроцилиндров привода рукояти шарнирно-сочлененных манипуляторов лесозаготовительных машин и т.п. [5, 6].

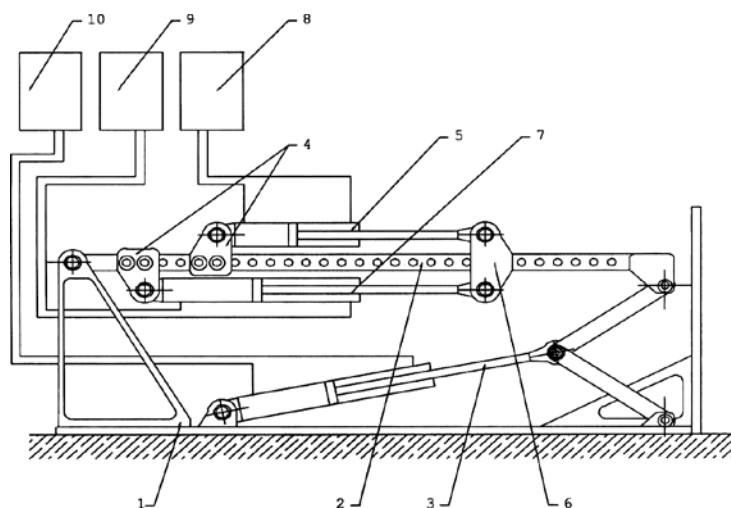


Рис. 1. Стенд для испытания гидроцилиндров

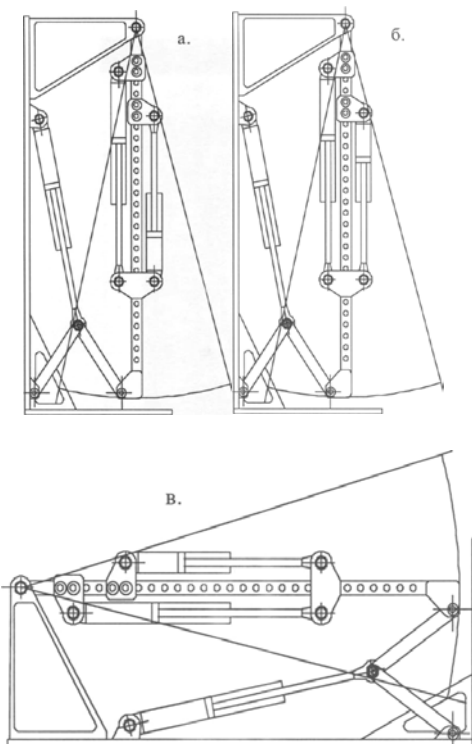


Рис. 2. Варианты расположения стенда с испытываемым гидроцилиндром

С целью устранения перечисленных недостатков, разработано техническое решение стенда для диагностирования и ресурсных испытаний гидроцилиндров машин различного назначения (RU№2498119). Стенд для испытания гидроцилиндров (Рис. 1) позволяет проводить ресурсные испытания гидроцилиндров привода стрелы (Рис. 2а), рукояти (Рис. 2б) и ковша (Рис. 2в) с расположением испытываемых гидроцилиндров близко к реальному.

Стенд для ресурсных испытаний гидроцилиндров (Рис. 1) состоит из рамы 6, на которой шарнирно закреплена качающаяся балка 1 с установленными гидроцилиндрами: 2 - приводным и 3 - испытываемым. Гидроцилиндры с помощью кареток 12 и 13 неподвижно закреплены на балке, а передача движения от приводного гидроцилиндра к испытываемому осуществляется через подвижную каретку 5. Конструкция балки предусматривает возможность испытания гидроцилиндров различных типоразмеров. Изменение угла

положения гидроцилиндра достигается перемещением штока гидроцилиндра 4 и тяг 7. Задание параметров циклов осуществляется применением контрольно-задающего блока 11, который передает сигнал на насосные блоки приводных и испытуемого гидроцилиндров.

Для задания параметров рабочего цикла гидроцилиндра используются известные реальные значения ходов штоков, скоростей перемещения и усилий [8,9].

Для испытания на герметичность (Рис. 3) к испытуемому гидроцилиндру присоединяется диагностическое устройство 10.

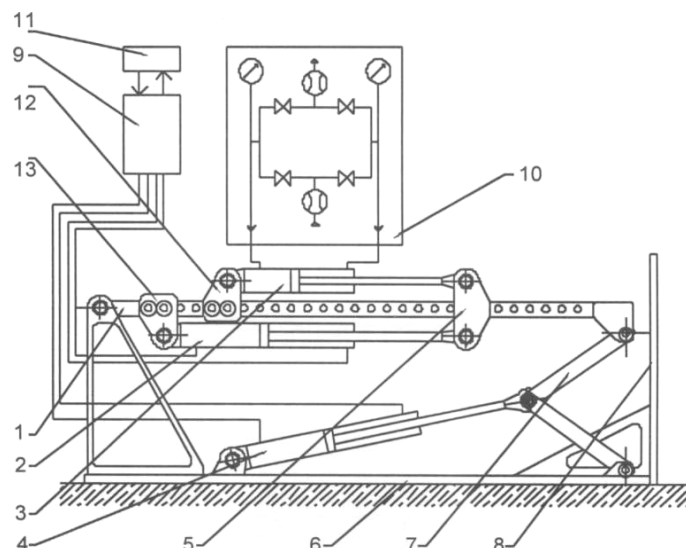


Рис. 3. Испытания гидроцилиндров на герметичность уплотнительных узлов.

Применение предлагаемого стенда позволяет повысить точность ресурсных испытаний, автоматически осуществлять формы графиков нагружения, перемещения и угла поворота испытуемого гидроцилиндра, проводить испытания широкой номенклатуры штоковых гидроцилиндров одно- и двустороннего действия, тем самым снизить затраты на испытания и ремонт гидроцилиндров.

Литература:

1. Кондаков Л.А. и др. Машиностроительный гидропривод. – М.: Машиностроение, 1978. – 495 с.: ил. – Библиогр.: С.487-491.
2. Никитин О.Ф., Хохлин К.Н. Объёмные гидравлические и пневматические приводы. – М.: Машиностроение, 1981. – 296 с.: ил. – Библиогр.: С.267.
3. Богданович Л.Б. Гидравлические приводы. – Киев: Вища школа, 1980. – 232 с.: ил. – Библиогр.: С.227-229
4. Демин В.Ф. и др. Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт гидравлических экскаваторов в Глпавмосстрое//Улучшение качества технического обслуживания и ремонта строительных машин. – М.: МДНТП, 1978. – С.97-102.
5. Закин Я.Х. и др. Диагностика технического состояния автомобиля. – М.: Транспорт, 1968. – 93 с.: ил. – Библиогр.: С.92-93.
6. Смоляницкий Э.А., Мокин Н.В. Гидравлические экскаваторы. Часть 1. Определение параметров. – Новосибирск: НИИЖТ, 1976. 86 с.: ил. – Библиогр.: С.82.
7. Васильченко В.А., Беркович Ф.Н. Гидравлический привод строительных и дорожных машин. – М.: Стройиздат, 1978. – 166 с.: ил. – Библиогр.: С.165.
8. Кобзов Д.Ю., Тарасов В.А., Трофимов А.А. Гидроцилиндры дорожных и строительных машин. Часть 2. Условия эксплуатации, рабочий процесс, режим работы и параметры нагружения. Деп. В ВИНТИ № 3552-1399. 108 с.
9. Кобзов Д.Ю. Гидроцилиндры дорожных и строительных машин. Часть 1. Конструкция. Надежность. Перспективы развития. Деп. В МАШМИР №2-сд98. 59 с.

Hydraulic cylinder diagnostic stand

Gerasimov S.V.^{1,a}, Kobzov A.Yu.^{1,b}, Sinitsyn S.A.^{1,c}, Zhuk E.A.^{1,d}, Tomilov S.A.^{1,e}

¹Bratsky State University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia

^acareer@mail.ru

Keywords: hydraulic cylinder, deformation, diagnostics, operating speeds, stroke of the rod

The present work is devoted to the description of the process of diagnosing hydraulic cylinders of working equipment of DSM and the development of a stand for testing and diagnosing hydraulic cylinders.

УДК 62-822

Обработка незатвердевших бетонных поверхностей поворотным ленточно-валковым рабочим органом бетоноотделочной машины.

Востоков Н.В.^{1,a} Кашуба В.Б.^{1,b} Мамаев Л.А.^{1,c}, Кашуба В.В.¹

Братский Государственный Университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^alotzip@yandex.ru, Vostokov12@mail.ru, kvb1964@yandex.ru, cpro_uch@brstu.ru

Ключевые слова: бетон, бетонные смеси, обработка, заглаживание, ленточно-валковые, поворотный.

В данной статье рассматривается один из способов обработки бетонных поверхностей, а именно обработка незатвердевших бетонных поверхностей с помощью ленточно-валкового рабочего органа. Описывается принцип работы ленточно-валкового рабочего органа и предоставляется схема его конструкции. Так же в статье рассматривается модернизация ленточно-валкового рабочего органа, а именно внедрение поворотного механизма. В статье описывается принцип действия поворотного ленточно-валкового рабочего органа, приводятся его достоинства и недостатки в сравнении с неповоротным рабочим органом. Обработка незатвердевших бетонных поверхностей на промышленных производствах трудоемкий процесс, требующий особого внимания. Внедрение данной модернизации позволит улучшить качество производимой продукции на производственных предприятиях и повысить прочностные характеристики бетонных изделий.

Бетон — искусственный каменный строительный материал, получаемый в результате формования и затвердевания рационально подобранной, тщательно перемешанной и уплотнённой смеси из минерального (чаще всего это портландцемент) или органического вяжущего вещества, крупного или мелкого заполнителей, воды. В ряде случаев может иметь в составе специальные добавки, а также не содержать воды.

В строительстве наиболее широко используют бетоны, изготовленные на цементах или других неорганических вяжущих. Эти бетоны обычно затворяют водой. Цемент и вода являются активными составляющими бетона; в результате реакции между ними образуется цементный камень, скрепляющий зерна заполнителя в монолит.

На органических вяжущих веществах (битум, минеральные смолы) бетонную смесь получают без введения воды, что обеспечивает высокую плотность и непроницаемость бетонов.

Заглаживание бетона является важной частью работ, влияющей на качество и прочностные характеристики бетона. Правильная обработка незатвердевших бетонных поверхностей позволяет устранить полости образовавшиеся внутри бетонной смеси, заглубить крупную фракцию компонентов бетона вглубь бетонной смеси, а более мелкую выгнать наружу тем самым делая поверхность бетона гладкой и ровной.

На кафедре СДМ БРГУ была предложена конструкция ленточно-валкового рабочего органа для обработки незатвердевших бетонных поверхностей, на которую была подана заявка на получение патента на изобретение. ([RU2022116513A](#))

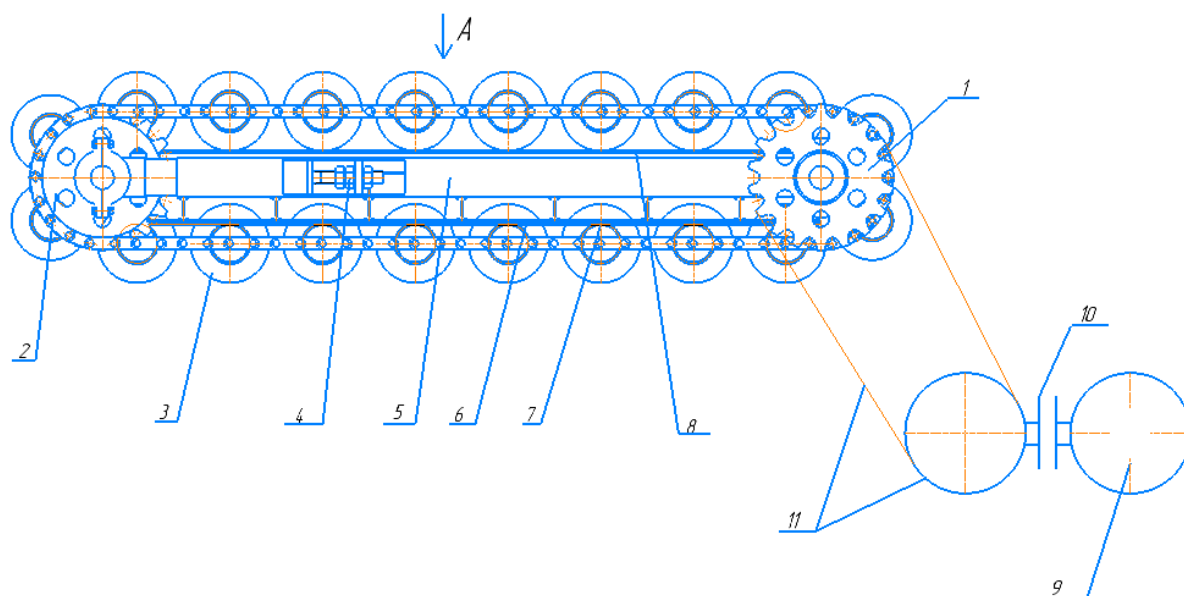
Конструкция представлена на рисунке № 1 (а,б)

Устройство работает следующим образом. При включении, электродвигатель 9, через соединительную муфту 10 и ременной передачи 11 передает крутящий момент ведущей звездочке 1, что приводит в движение огибающую ведущую и ведомую 2 звездочке приводную роликовую цепь и расположенные на ней заглаживающие валки 3, имеющие зубчатые зацепления 7. Заглаживающие валки, помимо основного движения по цепи, за счет контакта зацеплений 7 с зубчатой рейкой 6, совершает дополнительное круговое вращение. Степень натяжения роликовой цепи 8 регулируют установленным на раме 5 натяжным устройством 4.

Отличительная особенность данного технического решения заключается в том что валки объединяются в ленту.

Преимуществом такой конструкции является устранение больших неровностей, раковин, заглублений, выступающих крупных зерен заполнителя. При заглаживании удаляется находящийся в смеси воздух, защемленные пузырьки воздуха всплывают на поверхность, происходит более компактная упаковка зерен бетонной смеси. Это обеспечивает получение более плотного бетона с морозостойкой, водонепроницаемой и прочной структурой.

С помощью бетоноотделочной машины, с ленточно-валковым рабочим органом, сглаживаются все выступы, неровности и подготавливая бетонную поверхность для использования или дальнейшей укладки чистовых напольных покрытий.



а)

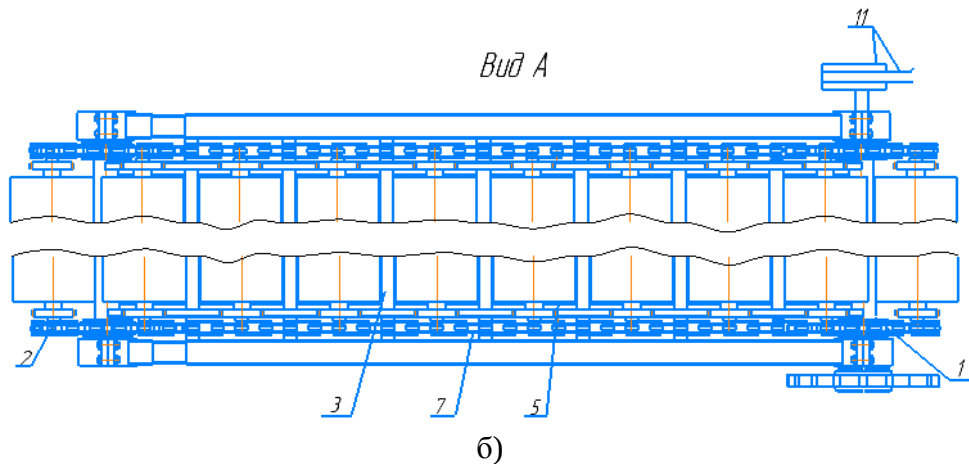


Рис. 1. Конструкция ленточно-валковой бетоноотделочной машины

а – вид с боку, б – вид сверху

1 и 2 – ведущая и ведомая звезды, 3 – заглаживающие валки 4 – натяжное устройство, 5 – рама, 6 – зубчатая рейка, 7 – зубчатые зацепления, 8 – приводная цепь, 9 – электродвигатель, 10 – муфта, 11 – ременная передача,

Линия контакта рабочего органа с элементарной площадкой, выделенной на поверхности, будет формироваться за счёт поступательного перемещения валков, объединённых в ленту, кругового (вращательного) движения отдельных валков и поступательного перемещения самой бетоноотделочной машины. При этом следует учитывать количество валков, расположенных на трущейся ветви ленты, наличие зазоров между валками, различие в скоростях ленты и окружной скорости валков. Следовательно, заглаживающая способность ленточно-валкового рабочего органа в первом приближении, может быть определена по зависимости:

$$S_{л.-в.} = \frac{V_b \sqrt{da} n + V_l (l_l k + \sqrt{Da})}{V_3}, \quad (1)$$

где, V_b - окружная скорость валка, м/с; d - диаметр валка, м; a – глубина погружения валка, м; n – число валков, образующих трущуюся ветвь ленты; V_l – скорость ленты, м/с; l_l – длина трущейся ветви ленты, м; $k < 1$ – коэффициент, учитывающий уменьшение длины трущейся ветви ленты из-за зазоров между валками; D – диаметр ведущей звёздочки, м; V_3 – скорость заглаживания, м/с.

Следует отметить, что формула работает только в том случае если рабочий орган ориентирован в направлении заглаживания. Однако проведенное в 70-х годах XX века экспериментальное исследование [1] показало, что ориентация ленточного рабочего органа под углом к направлению заглаживания позволяет существенно повысить заглаживающие способности таких рабочих органов. В связи с чем наиболее рациональными представляются конструкции ленточно-валкового рабочего органа с возможностью поворота на некоторый угол α в направлении заглаживания.

Применение валкового рабочего органа даёт возможность обрабатывать поверхность изделий за один проход, обеспечивает заглаживание криволинейных поверхностей, производит калибровку изделий с целью получения строгой геометрической формы. Ленточный рабочий орган, хотя и не обеспечивает заглаживания криволинейных поверхностей, обладает более высокой производительностью по сравнению с валковым.

Несмотря на отмеченные преимущества, доля заглаживающих машин с валковым рабочим органом не превышает 9% в общей массе эксплуатирующихся, а с ленточным рабочим органом не эксплуатируется вовсе, за исключением нескольких единиц, ранее введённых в опытную эксплуатацию.

Учитывая вышеизложенное предложено следующее техническое решение поворотного ленточно-валкового рабочего органа, который конструктивно представлен на рисунке 2.

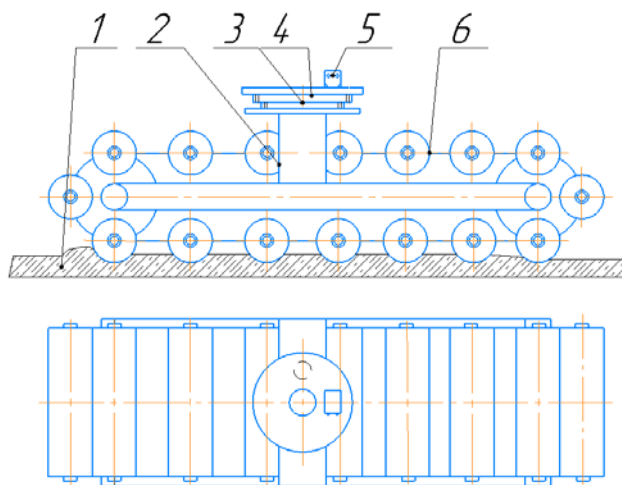


Рис.2 Поворотный ленточно-валковый рабочий орган.

1 – незатвердевшая бетонная смесь, 2 – подвесная опора, 3 – поворотный круг, 4 – поворотный механизм, 5 – гидравлический мотор, 6 – заглаживающие валки

Поворот рабочего органа осуществляется путем воздействия гидравлического мотора 5 на опорный поворотный круг 3, который является основой в конструкции. Изображение схематичное и не отражает финальный вид или концепции задуманной конструкции.

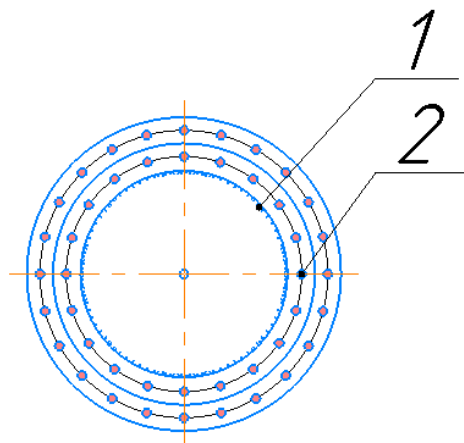


Рис. 3. Поворотный круг

1 – зубья шестерни, 2 крепежные отверстия с резьбой

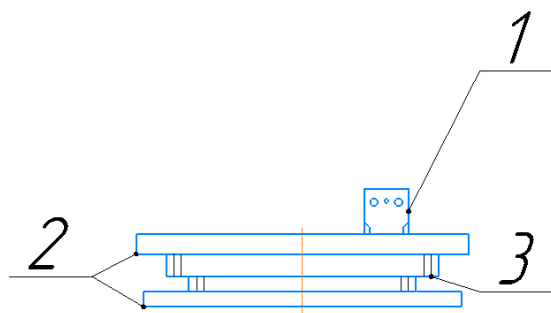


Рис 4. Поворотный механизм

1 – гидромотор; 2 – специальная основа, соединяющая рабочий орган, поворотный круг и крепление предусмотренное для механизма на заводе (арка, станина, кран и т п);

3 – опорный поворотный подшипник.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод: обработка бетонных поверхностей на производстве требует новых технических решений, а именно создание специализированных механизмов. В данной статье рассматривается модернизация уже существующего ленточно-валкового рабочего органа, а именно внедрение поворотного механизма. Данный поворотный механизм позволит изменять угол заглаживающего органа увеличивая площадь контакта рабочей поверхности вала и незатвердевшей бетонной смеси, что улучшит заглаживающие свойства рабочего органа и повысит качество обработки бетонной поверхности.

Литература:

1. А.В. Болотный – Теория и процессы заглаживания бетонных смесей. Ленинград 1974г.
2. Патент RU2022116513А от 17.06.2022 Авторы: Леонид Алексеевич Мамаев; Владимир Богданович Кашуба; Сергей Николаевич Герасимов; Юсуфджон Косимович Юсуфов; Вячеслав Сергеевич Фёдоров; Владимир Владимирович Кашуба
3. Сайт Beton, обработка бетонных поверхностей ссылка на сайт: <https://beton-house.com/obrabotka/obrabotka-betonnyh-poverhnostej-1083> (27.03.2025)
4. Сайт sciencedirect ссылка на сайт <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780080441009500863> (31.03.25)
5. Патент RU2016121483А, валковый вибрационный рабочий орган.
6. Сайт smsm.ru ссылка на сайт: <https://www.smsm.ru/articles/stroitelnyy-vibrator-naznachenie-kharakteristiki-raznovidnosti> (30.03.2025)
7. Статья Заглаживающая способность ленточно-валкового рабочего органа бетоноотделочной машины. Братский государственный университет Мамаев Л. А., Кашуба В.Б., Кашуба В.В., Сангзода А.А.
8. Статья Планирование экспериментальных исследований ленточно-валкового рабочего органа бетоноотделочной машины Братский государственный университет Мамаев Л. А., Кашуба В.Б., Кашуба В.В., Сангзода А.А.

Treatment of uncured concrete surfaces with a rotary belt-roller working body of a concrete-finishing machine.

Vostokov N.V.^{1,a}, Kashuba V.B.^{1,b}, Mamaev L.A.¹, Kashuba V. V.¹

¹Bratsk State University, 40 Makarenko str., Bratsk, Russia

^aVostokov12@mail.ru, ^bkvb1964@yandex.ru,

Keywords: concrete, concrete mixes, processing, smoothing, belt-rolling, rotary.

This article discusses one of the methods of processing concrete surfaces, namely the treatment of uncured concrete surfaces using a belt-roller working body. The principle of operation of a belt-roller working body is described and a diagram of its design is provided. The article also discusses the modernization of the belt-roller working body, namely the introduction of a rotary mechanism. The article describes the principle of operation of a rotary belt-roller working body, and provides its advantages and disadvantages in comparison with a non-rotating working body. The processing of uncured concrete surfaces in industrial plants is a laborious process that requires special attention. The implementation of this modernization will improve the quality of manufactured products at manufacturing plants and increase the strength characteristics of concrete products.

УДК 621.923.5:691.328

Определение заглаживающей способности дискового рабочего органа с дополнительным круговым движением

Портнягина А.В.^{1,а}, Занозовский А.И., Сиянпин Н.В.¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия^а portnyagina_1408@mail.ru

Ключевые слова: анализ, рациональный выбор, автоматизация, оптимальные режимы резания, эффективность, программный продукт, композиционные материалы.

В статье рассмотрено исследование посвященное определению заглаживающей способности дискового рабочего органа бетоноотделочной машины. Заглаживающая способность определяется длиной контактной линии между диском и обрабатываемой поверхностью с учетом сил трения. Анализируется кинематическая схема диска, совершающего вращательное и поступательное движение. Численное моделирование в MathCAD позволило оценить влияние радиуса диска, передаточного отношения и радиуса кругового движения на качество обработки.

Многочисленные исследования [1–7] в области оценки влияния заглаживающей способности на качество поверхности показали, что для достижения требуемой чистоты обработки железобетонных изделий необходимо обеспечить определенную степень воздействия рабочего органа. Эта степень зависит от заглаживающей способности машины, которая определяется длиной контактной линии между рабочим органом и элементарной площадкой обрабатываемой поверхности с учетом сил трения. Данная длина и представляет собой заглаживающую способность рабочего органа [1, 2].

Кинематическая схема дискового рабочего органа

Рассмотрим дисковый рабочий орган (рис. 1), в котором заглаживающий диск вращается с угловой скоростью ω , одновременно перемещаясь поступательно со скоростью V и совершая круговое движение вокруг точки O со скоростью V . Кинематическая схема такого механизма представлена на рис. 2.

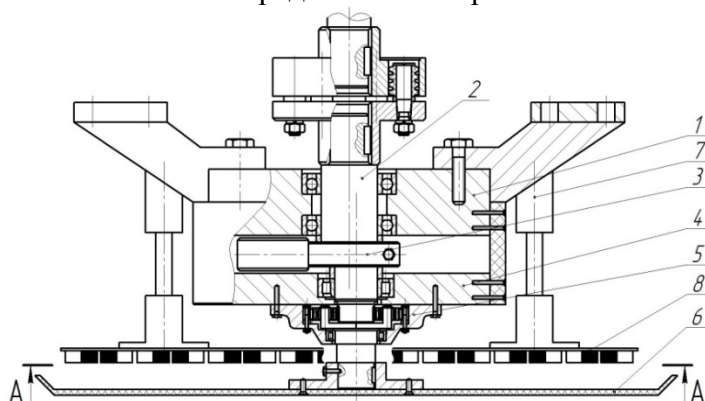


Рис. 1 Дисковый рабочий орган бетоноотделочной машины с магнитным активатором и дополнительным круговым движением заглаживающего диска.

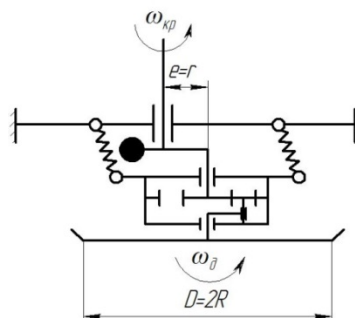


Рис. 2. Кинематическая схема дискового рабочего органа с дополнительным круговым движением

Если радиус кругового движения r значительно меньше радиуса диска R , то фронт заглаживания можно принять равным диаметру диска. Заглаживающая способность точек диска определяется для элементарных площадок, движущихся по хордам (рис. 3).

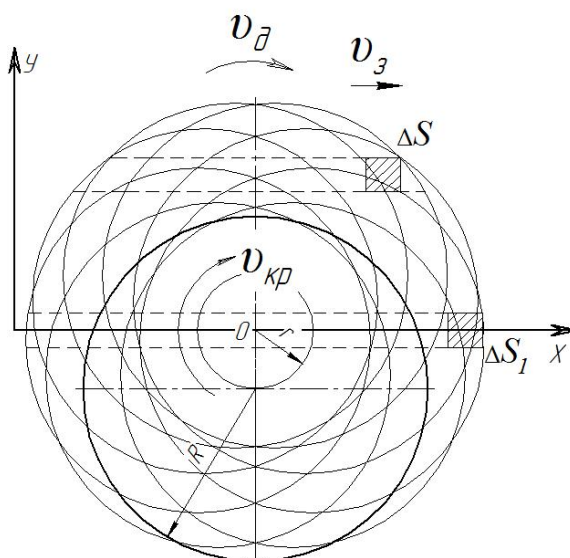


Рис. 3. Схема к определению заглаживающей способности ДРО

Заглаживающая способность дисковых рабочих органов, согласно [2], в общем, виде может быть определена:

$$S_d = \int_{t_0}^t v dt,$$

причем

$$v = \frac{dS}{dt} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}.$$

Согласно рисунку 5, получим координаты точки М в подвижной системе

$$\begin{aligned} x &= v_3 t + r \sin \omega_{кр} t + R \sin \omega_0 t, \\ y &= -r \cos \omega_{кр} t - R \cos \omega_0 t. \end{aligned}$$

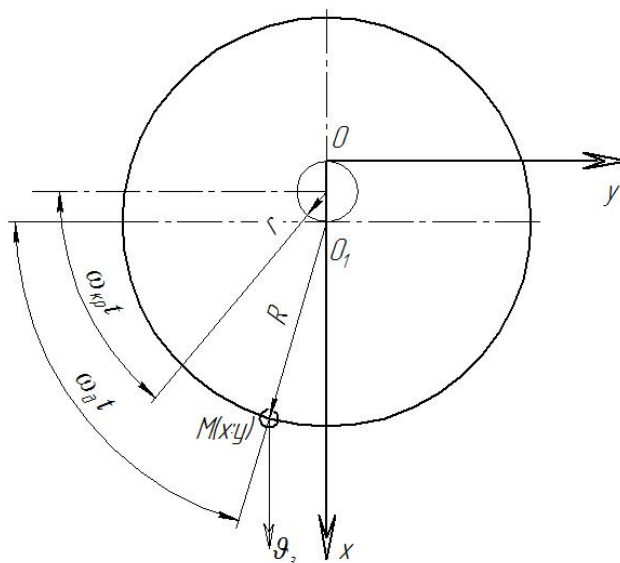


Рис. 5. Схема к определению заглаживающей способности дискового рабочего органа

После дифференцирования и преобразований с учетом тригонометрических тождеств уравнение принимает вид:

$$S_{\delta} = \int_{t_0}^t \sqrt{v_3^2 + r^2 \omega^2 + i^2 R^2 \omega^2 + (i^2 r R \omega^2 + 2v_3 r \omega) \cos \omega t + i^2 R v_3 \omega \cos 2\omega t} dt$$

Для удобства использования обозначим: $a = v_3^2 + r^2 \omega^2 + i^2 R^2 \omega^2$; $b = i^2 r R \omega^2 + 2v_3 r \omega$; $c = i^2 v_3 R \omega$. Тогда уравнение примет вид:

$$S_{\delta} = \int_{t_0}^t \sqrt{a + b \cos \omega t + c \cos 2\omega t} dt$$

Это уравнение было проинтегрировано численно в MathCAD, что позволило получить расчетные данные заглаживающей способности от ключевых параметров.

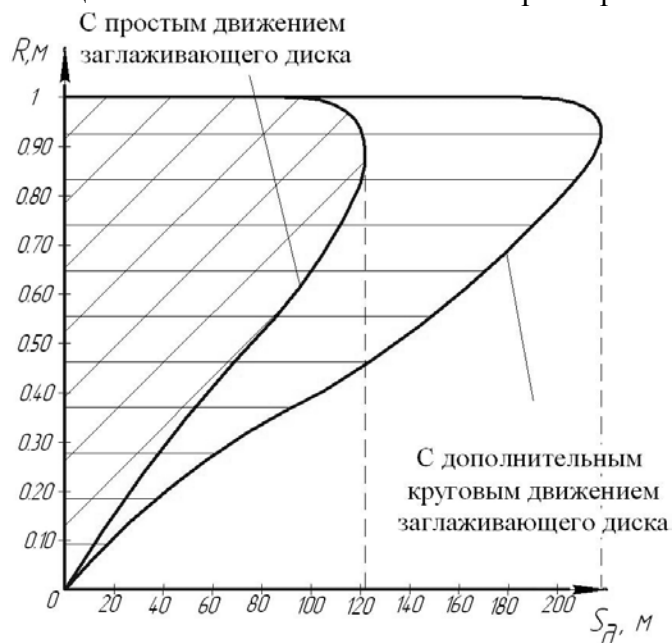


Рис.6. Эпюра распределение величины S_{δ} .

Анализ расчетных данных:

1. Влияние передаточного отношения (i). При фиксированных параметрах ($R = 0,575$ м, $r = 0,00625$ м, $\omega = 3$ с⁻¹, $V = 0,01$ м/с) заглаживающая способность возрастает с увеличением i . Оптимальный диапазон: $i = 6...10$, так как дальнейший рост приводит к динамическим перегрузкам.
2. Влияние радиуса кругового движения (r). Увеличение r (при $i = 8$) снижает S , при этом оптимальное значение составляет $r \approx 0,0025-0,005$ м.
3. Влияние радиуса диска (R). Заглаживающая способность растет с увеличением R , однако при $R > 1$ м возникает разбрызгивание бетонной смеси из-за высокой окружной скорости.

Распределение заглаживающей способности по ширине диска

Как видно из эпюр (рис.6) максимального значения S_d достигает в интервале $R = (0,8...1)$ м, затем S стремится к 0, т.к. увеличение радиуса диска приводит к значительному увеличению окружной скорости на концах заглаживающего диска, в результате чего происходит разбрызгивание бетонной смеси, а значит, снижается качество обработки бетонной поверхности. Оптимальные параметры: $i = 6...10$, $r \approx 0,0025-0,005$ м, $R=(0,8..1)$ м. Использование дисков большего диаметра экономически нецелесообразно из-за сложности изготовления и быстрого износа [2].

Плавность изменения значений S , а также сравнительно небольшой перепад в их численных значениях, позволяет сделать вывод о том, что рабочие органы с таким видом движения могут быть использованы для отделки бетонных поверхностей.

Литература:

1. Федоров В.С. Совершенствование процесса и агрегата финишной обработки незатвердевших бетонных поверхностей: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13. Братск, 2011. 167 с.
2. Болотный А.В. Теория и процессы заглаживания: дис. д-ра техн. наук: 05.05.04 / Ленингр. инженер.-строит. ин-т. -Л., 1974. – 289 с., ил.
3. Герасимов С. Н. Определение рациональных параметров и режимов работы вибрационного дискового рабочего органа для обработки бетонных поверхностей: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 : Хабаровск, 2003 210 с.
4. Кашуба В. Б. Разработка методологических основ создания бетоноотделочных машин с дисковыми высокочастотными рабочими органами: дис. канд. техн. наук: 05.02.13 / Братск, 2008.- 205 с.
5. Мамаев, Л.А. Методология совершенствования теории взаимодействия рабочих органов бетоноотделочных машин с поверхностью обрабатываемых сред: дис. д-ра техн. наук / Л.А. Мамаев. - СПб.: СПбГАСУ, 2007. – 360 с.
6. Райчик, Я. Оптимизация параметров заглаживающих машин для обработки поверхностей отформованных из пластичных смесей в условиях производства в ПНР: дис. д-ра техн. наук / Я. Райчик – Л.: СПбГПУ, 1999. – 292 с.
7. Ситов И. С. Динамика взаимодействия брусового рабочего органа бетоноотделочной машины с обрабатываемой средой : Дис. канд. техн. наук: 05.02.13.- Братск, 2008.- 197 с.

Definition of the smoothing ability of a disc working tool with additional circular motion

Portnyagina A.V^{1,a}, Zanozovskij A.I., Siyanpin N.V.

¹Bratsk State University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia

^aportnyagina_1408@mail.ru

Keywords: analysis, rational selection, automation, optimal cutting modes, efficiency, software, composite materials.

The article presents a study devoted to determining the smoothing ability of a disc working tool in a concrete finishing machine. The smoothing ability is determined by the length of the contact line between the disc and the treated surface, taking into account friction forces. The kinematic scheme of the disc performing rotational and translational motion is analyzed. Numerical modeling in MathCAD allowed evaluating the influence of the disc radius, gear ratio, and circular motion radius on the processing quality.

***СОВРЕМЕННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ И
АВТОМАТИЗАЦИЯ В
МАШИНОСТРОЕНИИ***

УДК 621.923

Оценка выполнения условия силового замыкания при наладке операций проходного бесцентрового шлифования

Малинин П.В.^{1,a}, Бочкарев П.Ю.^{1,2,b}

¹Камышинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», ул. Ленина 6а, Камышин, Россия

²Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, пр-кт им. Петра Столыпина зд. 4, стр. 3, Саратов, Россия

^ampv92@yandex.ru, ^bbpy@mail.ru,

Ключевые слова: механообрабатывающее производство, технологическая подготовка, продольное бесцентровое шлифование, проектирование технологических процессов, условия силового замыкания.

Исследование посвящено изучению современных методов обработки поверхностей тел вращения. Эти методы позволяют повысить производительность и обеспечить стабильность заданных характеристик. Одним из наиболее перспективных методов является бесцентрово-шлифовальная обработка. Однако её применение требует тщательного технологического сопровождения, которое часто носит субъективный характер. Для оценки качества выполнения проектной процедуры назначения параметров наладки оборудования предлагается использовать разработанные зависимости, которые анализируют места контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической системы. Результаты исследования подтвердили необходимость анализа выполнения требования силового замыкания в качестве одного из важнейших параметров качества выполнения работ. Полученные зависимости и результаты промышленных испытаний обозначили важность проведения анализа выполнения данного требования с учётом реального состояния технологической системы.

Полученные теоретические исследования, разработанные алгоритмы и программное обеспечение способствуют развитию научно-методической базы создания системы автоматизированного проектирования операций, выполняемых на бесцентрово-шлифовальных станках.

Введение.

Эксплуатационные свойства продукции машиностроения во многом зависят от качества обработки поверхностей деталей, которые контактируют с другими поверхностями в собранном узле. Расположение и точность этих поверхностей — ключевые показатели, которые отражают эффективность процессов их производства и сборки. Современные требования к производственным системам направлены на повышение производительности и обеспечение стабильности характеристик, заданных конструктором. Выполнение этих требований зависит от выбранных методов обработки поверхностей в процессе изготовления деталей.

Среди таких методов обработки цилиндрических поверхностей можно выделить бесцентровое шлифование [1,2,3,4] как наиболее перспективный с точки зрения повышения производительности и обеспечения стабильности характеристик. Этот метод зарекомендовал себя как эффективный в некоторых отраслях и конкретных условиях производства, особенно в подшипниковой промышленности. Анализ причин, связанных с ограничениями в использовании бесцентрового шлифования [5,6,7], показал, что они вызваны недостаточной проработкой научно-методической базы вопросов технологической подготовки.

Теория.

В результате исследований, направленных на совершенствование проектных процедур и управление операциями бесцентрового шлифования, были разработаны модели [8,9,10], которые позволяют установить взаимосвязь между размерными характеристиками обрабатываемой поверхности и элементами технологической системы оборудования. Эти модели позволяют определить наладочные параметры, которые можно регулировать с помощью рабочих органов станка, учитывая реальное состояние средств технологического оснащения.

Предлагаемый подход позволяет определить точки контакта поверхности заготовки со шлифовальным и ведущим кругами, а также с опорной поверхностью ножа для сечения рабочей зоны станка, в которой выполняется наладка оборудования. На основе этой информации создана математическая модель, которая позволяет получить объективное заключение о качестве наладки в части обеспечения силового замыкания [11], которое является одним из ключевых факторов соблюдения качества выполнения операций.

На рисунке 1 представлена схема бесцентрового шлифования наружной цилиндрической поверхности с обозначенными точками контакта в координатных сетках. Для оценки выполнения требования силового замыкания в рассматриваемом сечении рабочей зоны предлагается анализировать расположение точек контакта в двух координатной системе с центром на оси заготовки. Формулы, представленные в работах [12, 13, 14], позволяют рассчитать координаты точек А, В, Р в горизонтальной и вертикальной плоскостях (X, Y).

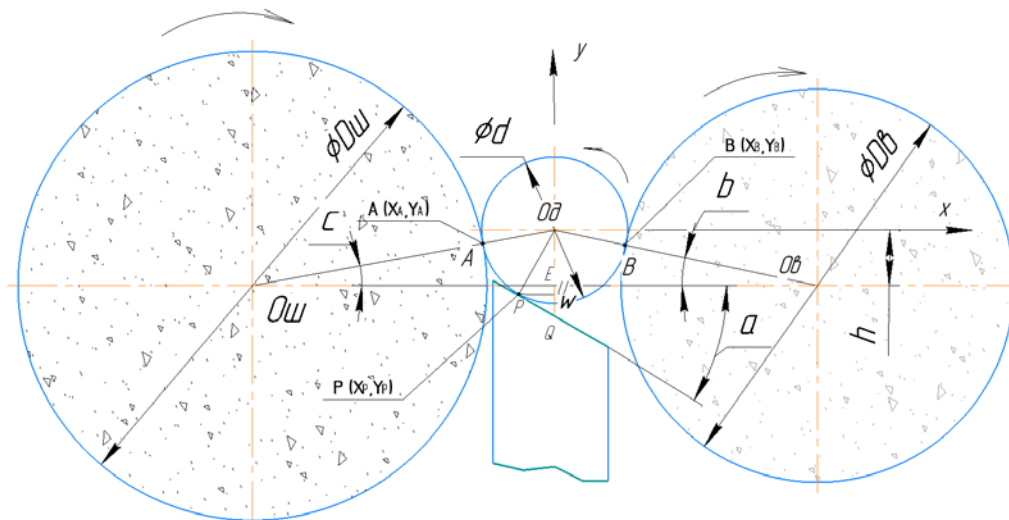


Рис. 1 Схема проходного бесцентрового шлифования с указанием координат точек контакта заготовки и элементов технологической оснастки

Для проверки требования, что все три точки лежат на одной окружности, запишем систему уравнений:

$$\begin{aligned} X_A^2 + Y_A^2 + 2 * a * X_A + 2 * b * Y_A + c &= 0 \\ X_B^2 + Y_B^2 + 2 * a * X_B + 2 * b * Y_B + c &= 0 \\ X_P^2 + Y_P^2 + 2 * a * X_P + 2 * b * Y_P + c &= 0 \end{aligned}$$

Выполнив подстановку с неизвестными переменными a, b, c :

$$\begin{aligned} 2 * X_A * a + 2 * Y_A * b + c + X_A^2 + Y_A^2 &= 0 \\ 2 * X_B * a + 2 * Y_B * b + c + X_B^2 + Y_B^2 &= 0 \\ 2 * X_P * a + 2 * Y_P * b + c + X_P^2 + Y_P^2 &= 0 \end{aligned}$$

Представим систему уравнений в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} 2X_A & 2Y_A & 1 \\ 2X_B & 2Y_B & 1 \\ 2X_P & 2Y_P & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(X_A^2 + Y_A^2) \\ -(X_B^2 + Y_B^2) \\ -(X_P^2 + Y_P^2) \end{bmatrix}$$

Применение метода Гаусса для решения системы уравнений позволяет получить следующие результаты:

- в случае отсутствия решения – вывод, что точки коллинеарны (окружность через них провести нельзя), следовательно, условие силового замыкания не выполняется;
- определить координаты центра окружности и ее радиус $x_0 = a$, $y_0 = b$, $R = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 - c}$ и уравнение окружности, сопоставляя которые со значениями допуска на обрабатываемую поверхность и припуском на технологический переход делается заключение о соблюдении требования силового замыкания.

Разработана блок-схема и алгоритмическое обеспечение для выполнения проектной процедуры установления соответствия при назначении наладочных параметров для операций проходного бесцентрового шлифования. Исходная информация включает три группы данных: реальные размерные параметры технологического оснащения, информация из технологической документации и значение высоты центра обрабатываемой поверхности, рассчитанное или выбранное из нормативно-справочной литературы (Н).

Процесс выполнения процедуры состоит из нескольких последовательных шагов:

1. Определение параметров настройки на основе реального состояния оборудования с использованием разработанных зависимостей.
2. Определение координат точек соприкосновения обрабатываемой поверхности с элементами системы. В качестве центра координат выбирается центр заготовки.
3. Вычисление координат центра и радиуса окружности с использованием известной и проверенной автоматизированной подсистемы на основе координат трёх точек.
4. Проверка выполнения условия силового замыкания.

Результаты и обсуждение.

Методика позволяет анализировать различные варианты результатов расчётов параметров настройки и выбирать оптимальные значения высоты центра обрабатываемой поверхности (Н) на основе критерия соответствия условию силового замыкания.

Проверка предложенной методики оценки выполнения требования силового замыкания при настройке была проведена на основе исходных данных производства деталей на станках Sasl 200×500:

— наружное кольцо подшипника 6-170314Ш1.01 ГОСТ 520-2011, изготовленное на АО «ЕПК Саратов»;

— прямолинейный ролик с радиусными скосами, II степени сложности 42926 04 (EN 12080), изготовленный в цехе №24 АО «ЕПК Саратов».

В ходе экспериментальных исследований, которые подтвердили эффективность созданных моделей расчёта наладочных параметров, были определены удобные форматы и порядок ввода данных о реальном состоянии технологической системы и представления результатов. Такой подход был сделан с целью упрощения и наглядности процедуры с учётом рекомендаций инженерно-технического персонала предприятия.

Результаты проведённых исследований показывают, что в перечень основных критериев оценки качества работ по настройке процессов бесцентрового шлифования нужно добавить параметр обеспечения условия силового замыкания. Полученные в ходе экспериментов зависимости и данные позволяют оценить, насколько этот критерий соответствует текущему состоянию технологической системы.

Для обеспечения высокого качества операций бесцентрового шлифования, необходимо применять комплексный подход к выполнению этапов проектирования. Эти этапы должны быть не только связаны между собой на информационном уровне, но и иметь содержательное единство. От того, насколько правильно будет настроено оборудование на

этапе наладки, зависит качество обрабатываемой поверхности и производительность выполнения операции.

Выводы.

Разработанные модели, алгоритм и программное обеспечение, позволяют оценить соблюдение условия силового замыкания на основе анализа точек контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической оснастки в процессе наладки. Результаты теоретических исследований и их практическое применение расширяют объективную составляющую процедуры и способствуют развитию научно-методической базы для создания системы автоматизированного проектирования операций на бесцентрово-шлифовальных станках.

Литература:

1. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. М. : Машиностроение, 1986. Т. 2. 4-е изд., перераб. и доп. 1986. 496 с.
2. Безъязычный В.Ф. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. — М.: Машиностроение, 2013. — 568 с.: ил.
3. Справочник технолога / под общей ред. А. Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
4. Слонимский В.И., Теория и практика бесцентрового шлифования. Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1952.- 283 с.
5. Прохоров А.Ф., Константинов К.Н., Волков Л.П., Наладка и эксплуатация бесцентровых шлифовальных станков. М., «Машиностроение», 1976. – 192 с.
6. Филькин В.П., Колтунов И.Б., Прогрессивные методы бесцентрового шлифования. М., «Машиностроение», 1971. – 204 с.
7. Муцялко В.И., Братчиков А.Я. Бесцентровое шлифование. Ленинград, «Машиностроение», 1986.- 96 с.
8. Малинин П.В. Структуризация способов бесцентрового шлифования с использованием кластерного анализа / П.В. Малинин, П.Ю. Бочкарев // Известия Волгоградского государственного технического университета. - 2022. - № 8. - С. 36-39.
9. Малинин П.В. Совершенствование технологической подготовки операций бесцентрового шлифования / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев, Л. Д. Ульянова, В. В. Шалунов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2022. – № 4(64). – С. 147-160.
10. Митин С.Г. Разработка моделей и методик автоматизации проектных процедур для проектирования технологических операций со сложной структурой / С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарев // Автоматизация в промышленности- 2018. - № 2. - С. 45-51.
11. Ашкиназий Я.М., Бесцентровые шлифовальные станки. Конструкции, обработка и правка. М.: Машиностроение, 2003. 352 с.: ил.
12. Малинин П.В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О. Определения наладочных параметров операций проходного бесцентрового шлифования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023 № 3 С. 144–153.
13. Малинин П.В., Бочкарев П. Ю. Группирование по технологическим признакам операций продольного бесцентрового шлифования // Воронежский научно-технический Вестник. 2024.Т.1(470). С. 61-69.
14. Малинин П.В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О. Взаимосвязанность сил при проходном бесцентровом шлифовании // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023 № 4.

Assessment of the fulfillment of the power fault condition during the adjustment of through-centerless grinding operations

Malinin P.V.^{1,a}, Bochkarev P.Yu.^{1,2,b}

¹Kamyshinsky Institute of Technology (branch) Volgograd State Technical University, Lenin str. 6a, Kamyshin, Russia

²Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, pr. Petra Stolypina zd. 4, p. 3, Saratov, Russia

^aMpv92@yandex.ru, ^bbpy@mail.ru,

Keywords: machining production, technological preparation, longitudinal centerless grinding, design of technological processes, power circuit conditions.

The research is devoted to the study of modern methods of surface treatment of bodies of rotation. These methods can improve productivity and ensure the stability of the specified characteristics. One of the most promising methods is centerless grinding. However, its application requires careful technological support, which is often subjective. To assess the quality of the design procedure for assigning equipment setup parameters, it is proposed to use the developed dependencies that analyze the contact points of the treated surface with the elements of the technological system. The results of the study confirmed the need to analyze the fulfillment of the requirement of a power circuit as one of the most important parameters of the quality of work. The obtained dependencies and the results of industrial tests indicated the importance of analyzing the fulfillment of this requirement, taking into account the actual state of the technological system. The theoretical studies obtained, the developed algorithms and software contribute to the development of the scientific and methodological basis for creating a system for computer-aided design of operations performed on centerless grinding machines.

УДК 681.518

Особенности подготовки технического задания в системе управления качеством на этапе конструкторской подготовки производства

Бурдо Г.Б.^{1,a}, Тарасов П.О.^{1,b}

¹Тверской государственный технический университет, наб. Афанасия Никитина, 22, г. Тверь, Россия

^agbtms@yandex.ru, ^btarasoff.1998@mail.ru

Ключевые слова: Конструкторская подготовка производства, показатели качества, техническое задание, система управления качеством.

Рассмотрена возможность повышения конкурентоспособности предприятия за счет улучшения качества на этапе конструкторской подготовки производства. Определены ключевые показатели, позволяющие измерять качество проектируемого изделия. Предложена система управления качеством, основанная на принципах общей теории управления и использовании выявленных показателей. Проведен анализ применимости данных показателей при разработке конструкторской документации на этапе проектирования. Подход ориентирован на формализацию показателей, оказывающих влияние на производственный процесс, эксплуатационные характеристик продукции и восприятие продукции потребителем, что способствует повышению эффективности работы предприятия.

Введение. В условиях глобализации и усиления конкуренции на мировых рынках машиностроительные предприятия сталкиваются с необходимостью постоянного поиска и реализации стратегий, обеспечивающих устойчивое конкурентное преимущество.

Машиностроение играет важную роль в экономическом развитии и является одной из ключевых отраслей промышленности Российской Федерации [1].

С учётом высокой капиталоемкости и длительности производства продукции, главным фактором получения конкурентного преимущества на машиностроительном предприятии является изготовление качественной продукции, которая всецело будет удовлетворять спрос потребителя. В условиях, когда потребители становятся всё более требовательными, а стандарты качества постоянно ужесточаются, способность предприятия обеспечивать высокое качество продукции становится не только инструментом удовлетворения спроса, но и основным фактором выживания предприятия в условиях рыночной конкуренции [2].

Согласно нормативу [3] качество – это степень соответствия совокупности присущих характеристик объекта требованиям. Понятие качества изделия рассматривается как ключевая характеристика поскольку определяет степень удовлетворенности потребителя получившемся продуктом.

Формирование модели выполнения этих требований и целевых технических характеристик изделия производится на этапе конструкторской подготовки производства при разработке конструкторской документации.

Технические характеристики продукта в соответствии с принятой на территории Российской Федерации системой разработки и постановки на производство новой продукции производственно-технического назначения [4] излагаются в Техническом задании, оформленном по ГОСТ 15.016 [5] как перечень требований, предъявляемых к продукту.

В то же время в связи с развитием системы управления качеством на предприятиях, а также появлением средств автоматизации жизненного цикла изделий становится актуальной проблема управления этими характеристиками при подготовке Технического задания на этапе конструкторской подготовки производства.

Цель и методология исследования. Целью настоящей статьи является исследование процесса управления качеством на этапе конструкторской подготовки производства с использованием показателей качества продукта для формулирования требований к содержанию Технического задания.

Методология настоящего исследования будет состоять в анализе стандартов и научных статей со сроком публикации не старше 5 лет.

Показатели качества продукции. Основная задача конструкторской подготовки производства с точки зрения качества состоит в формировании системы из целевых свойств изделия, достижение которых в процессе его изготовления позволит выполнить требования потребителя. Совокупность таких свойств характеризует качество изделия.

В процессе проектирования целевые свойства продукта могут быть описаны через показатели качества продукта [6].

Возможные показатели качества продукта широко описаны в научной литературе [7, 8, 9] и стандартах [10, 11, 12]. Среди них можно выделить следующие показатели:

1) Назначения (функциональные) – показатели, которые характеризуют способность изделия выполнять заложенную в нём функцию, это показатели, характеризующие степень соответствия назначению изделия;

2) Технологичность – удобство производства изделия с учётом производственных возможностей предприятия изготовителя;

3) Надёжность – комплексный показатель, который характеризует возможность изделия сохранять заложенные в нём характеристики на протяжении эксплуатации изделия с учётом проведения планового обслуживания и ремонта;

4) Ремонтопригодность – удобство восстановления работоспособного состояния изделия;

5) Эргономичность – удобство использования изделия потребителем согласно целевому назначению изделия;

6) Эстетичность – способность внешнего вида изделия быть приятным для потребителя;

7) Безопасность – способность изделия не создавать угрозу для жизни и здоровья человека;

8) Экономичность – показатель стоимости жизненного цикла изделия (затраты на плановые ремонты, обслуживание и эксплуатацию);

9) Транспортабельность – удобство транспортировки изделия к месту эксплуатации.

Обозначенные выше показатели качества можно считать наиболее распространёнными. В то же время в литературе и стандартах встречаются и другие показатели качества.

Так ГОСТ 2.119-2013 [13] «Эскизный проект» рекомендует обратить внимание на показатель качества «стандартизация и унификация» при оценке вариантов конструктивных решений.

В соответствии с ГОСТ Р 2.005-2023 [14] ЕСКД унифицированным изделие называется если конструкторская документация на него применяются сразу в нескольких изделиях, а стандартизованным если соответствует определённому нормативу, в котором описана его конструкция и порядок постановки на производство.

В результате ЕСКД позволяет сформулировать ещё два показателя качества:

10) Унифицированность – способность составных частей изделия быть использованными в конструкторской документации для других изделий.

11) Стандартизованность – степень соответствия свойств и порядка постановки на производство изделия стандарту.

Существуют так же современные требования к продукции, которые все чаще описываются в научной литературе [15, 16, 17], но в меньшей степени представлены в ГОСТ 15467 и ЕСКД. На основе них можно сформулировать следующие показатели качества:

12) Экологичность – способность изделия не представлять угрозу для окружающей среды и соответствовать требованиям нормативов в области охраны окружающей среды;

13) Патентно-правовой показатель – степень соответствия изделия нормативным документам в области защиты интеллектуальной собственности, «патентная чистота» изделия.

Показатели качества обладают некоторыми общими свойствами, которые могут быть полезны при их описании.

Так, одним из свойств показателей качества является их взаимозависимость, поскольку все они составляют части единого продукта как целостной системы. Изменение одного показателя качества неизбежно приводит к изменению другого. Наиболее распространённым примером может являться зависимость надёжности изделия от его стоимости, поскольку увеличение надёжности приводит к использованию более дорогих и качественных комплектующих. Другим примером может являться обратная зависимость надёжности от функциональности изделия, поскольку увеличение совокупности функций изделия приводит к усложнению продукта как системы и, как следствие, увеличению вероятности отказа.

По определению [6] свойством показателей качества является их количественная мера, поскольку показатель качества является количественной оценкой целевого свойства изделия.

Обозначенные выше свойства показателей качества позволяют использовать методологию математической оценки показателей, предлагаемую ГОСТ 15467. В нём среди прочего можно выделить «комплексный показатель качества», который можно рассматривать как совокупность показателей качества с учётом их отношений друг к другу и «интегральный показатель качества», который позволяет произвести оценку качества в случае наличия одного целевого свойства изделия (например, срока службы). Математическое описание для этих показателей представлено в упомянутом стандарте [6].

Управление качеством продукции. В результате анализа показателей качества продукта можно сделать вывод, что они в достаточной степени описывают свойства качества проектируемого изделия. Задачу управления качеством продукта на этапе конструкторской подготовки производства можно решить, используя множество показателей качества продукта, которые будут представлять собой количественную меру требуемых свойств.

Следовательно, выполнением основной задачи системы управления качеством в соответствии с ГОСТ 9001 на этапе конструкторской подготовки производства будет являться создание процессов, которые позволят управлять качеством через показатели качества продукции.

Для того, чтобы обеспечить показатели качества изделия, рассмотрим процесс управления ими с точки зрения общей теории управления (см. рисунок 1):

1. Качество изделия как объект управления (ОУ).

Объектом управления в таком случае будет являться качество изделия, поскольку им и требуется управлять при проектировании нового продукта

Для того, чтобы рассмотреть качество как объект управления, должны быть сформулированы целевые количественные свойства продукции там, где это возможно. В случае наличия качественных характеристик, они должны иметь количественную меру для того, чтобы они могли быть описаны как показатели качества. При этом объект управления будет подвергаться различного рода возмущениям, которые будут обусловлены естественным стремлением проекта продукта не соответствовать целевым свойствам по различным причинам (ошибки проектирования, влияние недостоверной информации).

2. Управляющая система (УС) качеством.

Для этапа конструкторской подготовки производства такой системой являются проектировщики конструкторского бюро, которые в процессе разработки меняют конструкцию изделия для того, чтобы улучшить качество. Они интегрированы в общую структуру менеджмента предприятия. Управляющее воздействие формирует руководство конструкторского подразделения в отношении проектировщиков, а уже они изменяет показатели качества при разработке КД (для удобства на схеме объединим эту цепочку управления в понятие «конструктор»).

Целью воздействия является приведение фактических показателей качества в соответствии с требуемыми. При этом сам процесс управления происходит в соответствии с требованиями ЕСКД и общими требованиями к организации работ в компании.

3. Механизм обратной связи (ОС) по фактическому уровню качества.

Обратная связь, нужна для того, чтобы изменить управляющее воздействие в системе управления качеством.

В процессе конструкторской подготовки производства должен использоваться интегрированный механизм обратной связи, содержащий оценку фактических показателей качества на каждом этапе конструкторских работ с точки зрения их соответствия заложенным.

4. Результатом процесса управления будет разработка проекта изделия, в котором будут достигнуты целевые показатели качества продукта. Производство изделия в соответствии с проектом обеспечит получение качественного продукта.

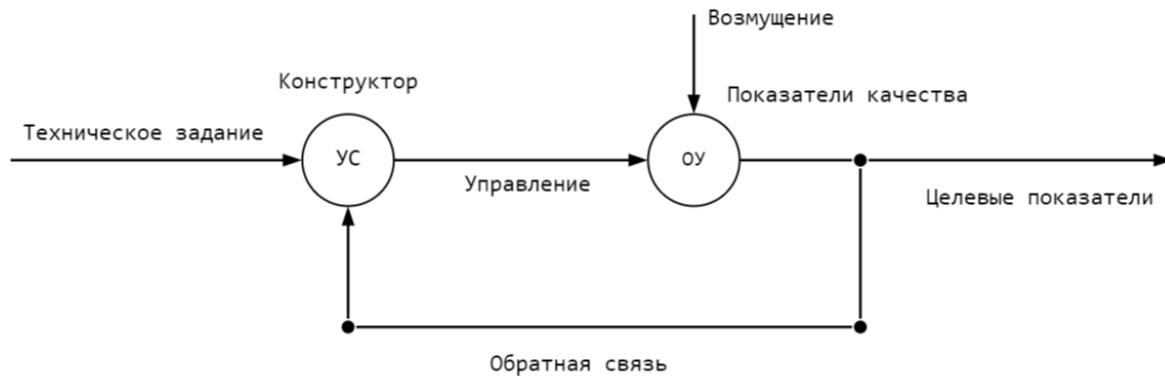


Рис. 1. Общая схема управления показателями качества продукции

Для предложенной схемы управления, исходной точкой управления качеством будет правильное описание целевых показателей качества продукта в Техническом задании на разработку изделия.

Результаты и обсуждение. В результате сбора и анализа описанных в литературе показателей качества можно сказать, что они в полной мере описывают требования, которые могут быть сформулированы для удовлетворения потребности потребителя. Кроме того, описание продукта с позиции показателей качества позволяет формализовать систему управления качеством и свести её к задаче управления качеством через изменение показателей качества продукта для этапа конструкторской подготовки производства.

Для того, чтобы реализовать этот принцип в первую очередь необходимо, чтобы соответствующим образом было разработано Техническое задание, в котором были бы выполнены следующие условия:

1. В тексте должны быть отражены показатели качества на основе требуемых свойств изделия: Назначения, технологичности, надёжности, ремонтпригодности, эргономичности, эстетичности, безопасности, экономичности, транспортабельности, унифицированности, стандартизованности, экологичности и патентно-правовые.

2. Для того, чтобы многообразие свойств изделия преобразовать в показатели качества, необходимо дать каждому свойству изделия количественную меру, что может быть достигнуто путем квантификации качественных показателей и описания количественных.

3. Показатели качества должны быть иметь определенную сетевую модель, в которой будет учтена взаимная связь показателей качества, для оценки выполнимости требований.

4. При разработке задания имеет смысл отразить в нём интегральный показатель качества и комплексный показатель качества для того, чтобы обозначить приоритетные показатели.

В результате создания технического задания на базе обозначенных выше принципов появляется возможность описания качества изделия как совокупности показателей качества. Количественная мера этих показателей открывает дорогу к созданию интеллектуальной информационной системы, позволяющей управлять качеством проекта изделия, что в свою очередь приведёт к реализации основных принципов системы управления качеством производства изделия на этапе конструкторской подготовки, заложенных в ГОСТ 9001.

Выводы. В результате проведения исследования были сформулированы типы показателей качества, которые должны присутствовать в Техническом задании. Необходимость их включения обоснована через обеспечение качества продукта путем создания системы управления качеством для конструкторской подготовки производства на базе управления показателями качества продукта. Обозначенный подход позволяет начать построение интеллектуальной информационной системы управления показателями качества в соответствии с упомянутой схемой управления для этапа конструкторской подготовки производства.

Дальнейшее направление работ может состоять в описании механизмов количественной оценки показателей качества с использованием методологии системного и математического анализа совместно с описанием влияния процессов управления конструкторской подготовкой производства на эти показатели при постановке на производство в соответствии с принятой нормативной документацией на территории Российской Федерации.

Литература:

1. Яковлев, Г. И. Особенности формирования и реализации стратегии инновационного развития машиностроительного предприятия / Г. И. Яковлев, А. В. Стрельцов // Вопросы инновационной экономики. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 375-390. – DOI 10.18334/vines.12.1.114070.
2. Маршавина Л. Я., Коряков А. Г., Слепов А. С. Стратегические конкурентные преимущества предприятий промышленности в современных условиях // Инновации и инвестиции. 2023. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/strategicheskie-konkurentnye-preimushchestva-innovatsionnyh-predpriyatiy-promyshlennosti-v-sovremennyh-usloviyah> (дата обращения: 04.02.2025).
3. ГОСТ Р ИСО 9001-2015 Системы менеджмента качества. Требования. – Введен впервые 01.11.2015. – М: Стандартинформ, 2015. – 32 с.
4. ГОСТ Р 15.301-2016. Система разработки и постановки продукции на производство (СПП). Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство. – Введ. 2017-07-01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 15 с.
5. ГОСТ 15.016-2016 Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению. М.: Стандартинформ, 2017. 26 с.
6. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения: межгосударственный стандарт: дата введения 01.07.1979 // Государственный комитет СССР по стандартам. – Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2009. – 21 с.
7. Куприков Н.М., Куприков М.Ю., Будкин Ю.В. Метод выбора типовых показателей качества новой техники в условиях неполной информации о результатах испытаний образцов аналогичного функционального назначения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-vybora-tipovyh-pokazateley-kachestva-izdeliy-novoy-tehniki-v-usloviyah-nepolnoy-informatsii-o-rezultatah-ispytaniy-obraztsov> (дата обращения: 05.02.2025).
8. Чекардовский С.М., Чекардовская И.А., Чекардовский М.Н. Проблемы надёжности функционирования оборудования нефтегазовой отрасли // ТНЖ. 2024. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-nadezhnosti-funktsionirovaniya-oborudovaniya-neftegazovoy-otrasli> (дата обращения: 05.02.2025).
9. Зимин Е.М., Мартишкин В.В. Определение качества технологий с учётом основных производственно-организационных мероприятий // ОНВ. 2020. №6 (174). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-kachestva-tehnologiy-s-uchetom-osnovnyh-proizvodstvenno-organizatsionnyh-meropriyatiy> (дата обращения: 05.02.2025).
10. ГОСТ Р 27.102-2021. Надёжность в технике. Надёжность объекта. Термины и определения: национальный стандарт: дата введения 01.01.2022 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Москва: ФГБУ «Институт стандартизации», 2021. – 35 с.
11. ГОСТ 14.205-83. Технологичность конструкции изделий. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2009. – 4 с.
12. ГОСТ 57276-2016. Эргономика. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. – 16 с.
13. ГОСТ 2.119-2013. Единая система конструкторской документации. Эскизный проект. М.: Стандартинформ, 2018. – 11 с.
14. ГОСТ 2.005-2023. Единая система конструкторской документации. Термины и определения. М.: Российский институт стандартизации, 2023. – 24 с.
15. Трофименко Ю.В. Перспективные направления повышения экологичности транспортных объектов и технологий // Информационные технологии и инновации на транспорте: материалы VI Международной научно-практической конференции. 2020. С. 127–133. EDN RPCDYT.

16. Каргинова-Губинова, В. В. Повышение экологичности грузового транспорта на основе учета конфликтов интересов заинтересованных сторон / В. В. Каргинова-Губинова // Среднерусский вестник общественных наук. – 2023. – Т. 18, № 2. – С. 147-165. – <https://doi.org/10.22394/2071-2367-2023-18-2-147165>. – EDN MEBIFN.

17. Шиллинглю Т. Важность патентов для целей международной торговли // Вестник Университета имени О.Е. Кутафина. – 2020. – № 2. – с. 70-80.

Features of preparation of technical specifications in the quality management system at the stage of design preparation of production

Burdo G.B.^{1,a}, Tarasov P.O.^{1,b}

¹Tver State Technical University, Afanasy Nikitin Embankment, 22, Tver, Russia

^agbtms@yandex.ru, ^btarasoff.1998@mail.ru

Keywords: Design preparation of production, quality indicators, technical specifications, quality management system.

The possibility of increasing the competitiveness of an enterprise by improving quality at the stage of design preparation for production is considered. Key indicators are defined that allow measuring the quality of the designed product. A quality management system based on the principles of general management theory and the use of the identified indicators is proposed. An analysis of the applicability of these indicators in the development of design documentation at the design stage is carried out. The approach is focused on the formalization of indicators that affect the production process, product performance characteristics and consumer perception of products, which helps to improve the efficiency of the enterprise.

УДК 004.9, 621.9, 621.923.9

Актуальность мировых машиностроительных трендов в 2025 году

Попов В.Ю.^{1,a}, Казаков Е.Г.^{1,b}, Абрамович О.П.^{1,c}, Зикирлов У.Ш.^{1,d},
Ревенко Н.И.^{1,e}

¹Братский государственный университет, ул.Макаренко 40, Братск, Россия

^aslapopov@gmail.com

Ключевые слова: машиностроение, робототехника, 3D-печать, автомобильная промышленность, САПР, актуальность, Google Тренды.

В статье проведён анализ интереса к отраслям Машиностроение, Робототехника, Аддитивное производство, Автомобильная промышленность через Google Trends за последние 15 лет (2010–2025) с учетом категорий Бизнес и промышленность, Работа и образование, Покупки, Финансы показывает следующие тренды.

Определено, что глобальный интерес к отрасли Машиностроение достиг пика в 2012–2015 (развитие Азии), затем сместился на цифровизацию. В России рост связан с модернизацией (2012–2014) и импортозамещением (2022–2023).

В категории Робототехника с 2015 был рост из-за Industry 4.0, пик в 2020–2022. В РФ с 2020 растёт интерес к промышленным роботам (санкции, ВПК, дроны, онлайн-курсы).

В категории Аддитивное производство пик 2013–2014 (хайп 3D-печати), затем спад из-за насыщения рынка, и возрождение с 2020 (медицина, автозапчасти). В РФ рост запросов на «3D-печать запчастей» (из-за дефицита).

В категории Автомобильная промышленность популярна тема электромобилей (EV), как драйвер роста. В РФ с 2022 произошёл обвал интереса к иномаркам (-90% «Mercedes»), но рост на китайские авто (+600%).

Определено, что санкции и импортозамещение усилили спрос на отечественные технологии, переход на EV и китайские авто перестроил рынок, а цифровизация сместила акценты в машиностроении.

Введение. Статистические сервисы, такие как Google Trends, позволяют отслеживать актуальный интерес к различным темам и научным исследованиям в режиме реального времени [1-3]. Анализировать популярность различных категорий можно как через фильтрацию лишних данных, так и через выбор релевантных ключевых слов на разных языках [4-6]. Это значительно ускоряет получение обратной связи от коллег о вашей работе, повышает видимость исследований для обычных пользователей и помогает точно выявлять целевую аудиторию. Уже около десяти лет такой подход успешно применяется нами при анализе динамики запросов по визуализации путей поиска новых рынков сбыта своей научной продукции [1-3]. Такой подход позволил поднять исследования на качественный уровень и ускорил получение конечного результата.

Методология исследований.

Используя Google Trends, мы исследуем интерес пользователей за 2010–2025 гг. к четырем отраслям, *Машиностроение, Робототехника, Аддитивное производство, Автомобильная промышленность*. Мы фокусируемся на таких категориях, как: *Покупки* (запросы, связанные с приобретением товаров и услуг внутри этих отраслей), *Бизнес и промышленность* (запросы, связанные с корпоративными новостями, инвестициями, технологиями по этим отраслям), *Работа и образование* (запросы, связанные с вакансиями, курсами, обучением по этим отраслям), *Финансы* (запросы, связанные с акциями, инвестициями, рынками капитала по этим отраслям).

Следует помнить, что Google Trends показывает относительную популярность запросов, а не абсолютные цифры. Региональные различия и язык запросов также могут влиять на получаемые результаты.

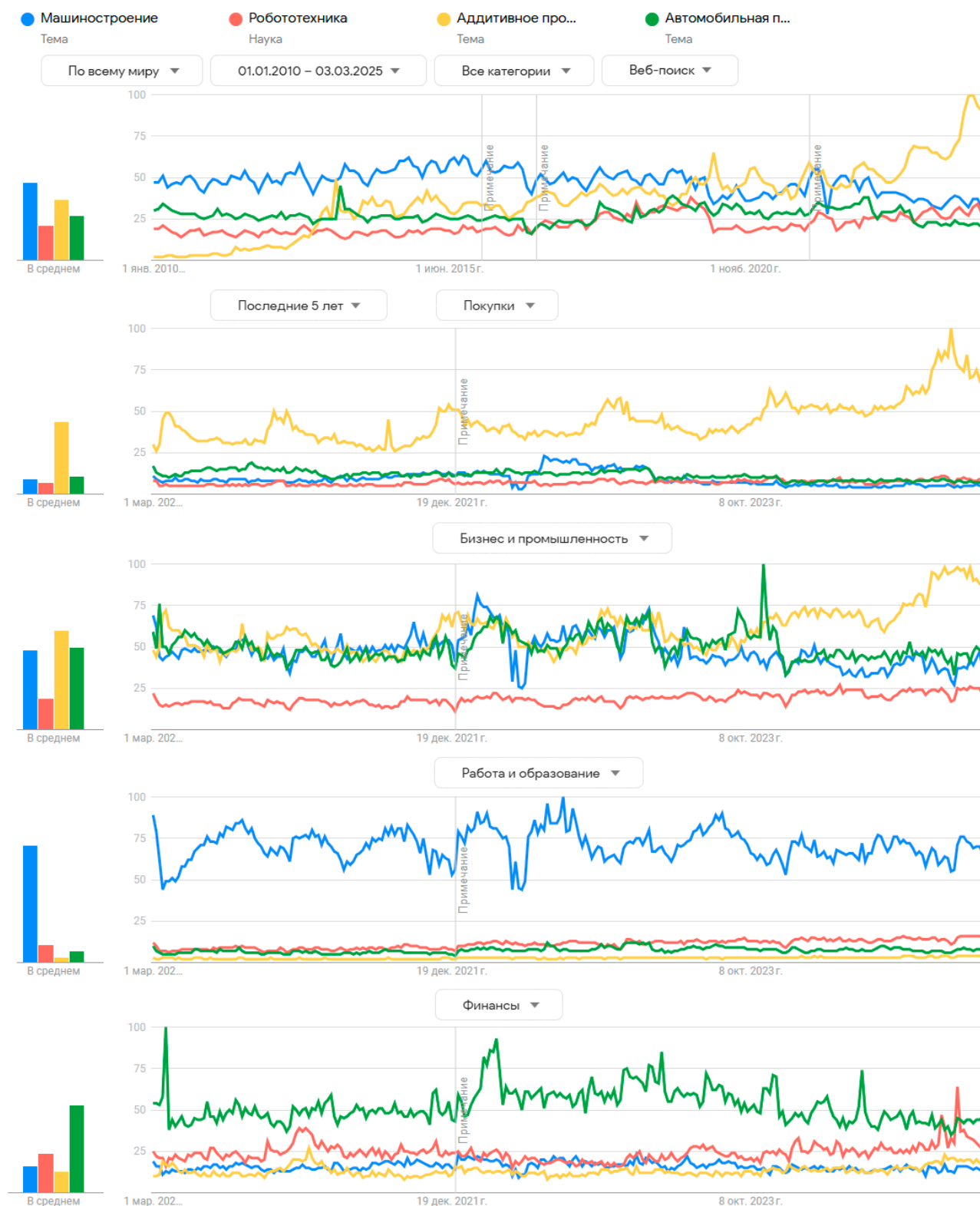


Рис. 1. Динамика популярности ключевых слов Машиностроение, Робототехника, Аддитивное производство, Автомобильная промышленность на русском языке за последние 15 лет по всему миру, а также за 5 лет в категориях Покупки, Бизнес и промышленность, Работа и образование, Финансы (на март 2025 года)

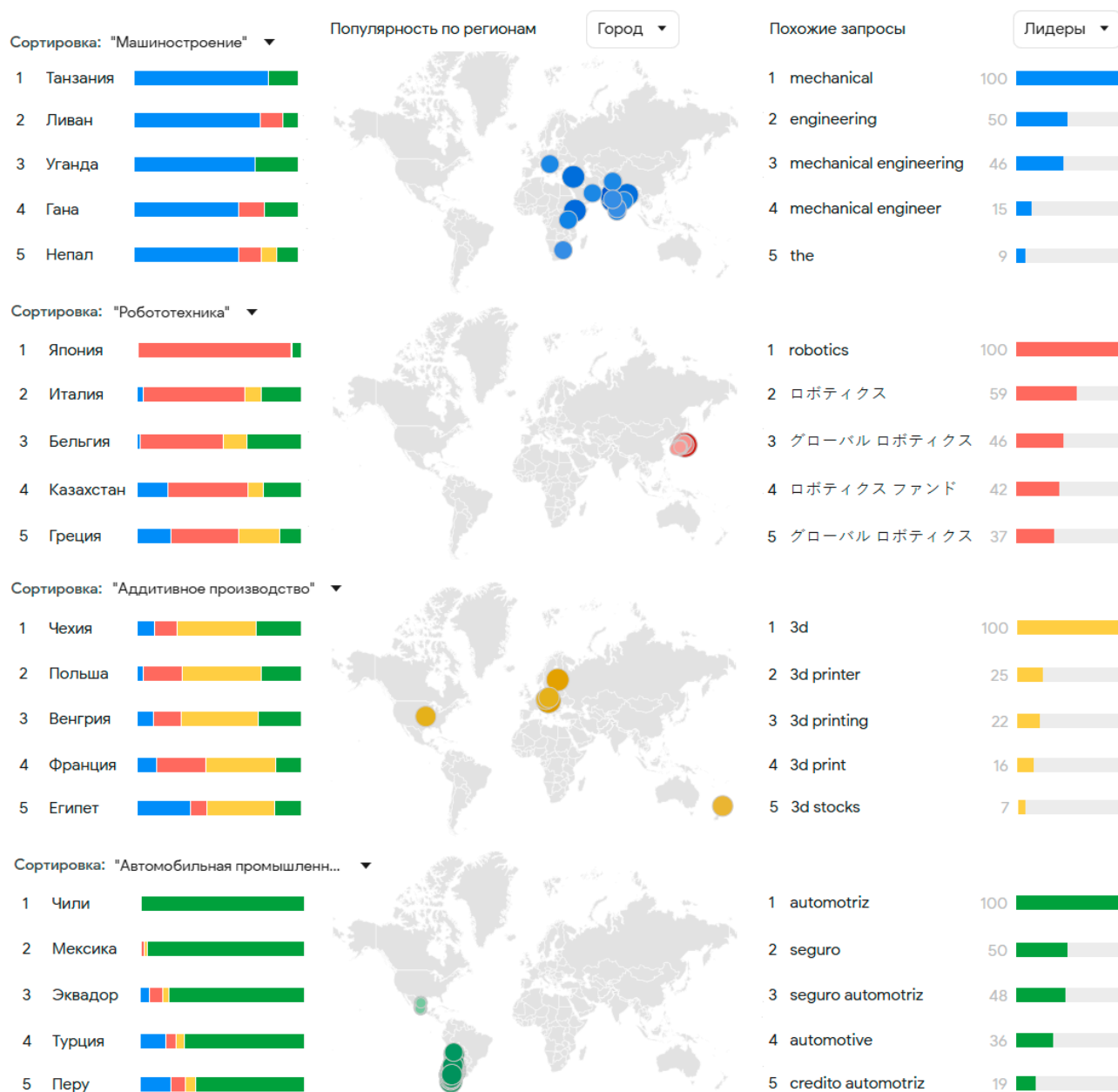


Рис. 2. Популярность запросов четырёх выбранных ключевых слов за последние 5 лет по всему миру, распределённая по степени снижения интереса в различных странах мира (на март 2025 года)

Ограничениями данных на сегодняшний день являются языковые барьеры, например, интерес к 3D-печати в Китае лучше искать по запросу с китайским термином, а не по запросу с английским аналогом. В категориях Google пользовательский запрос «робот» может относиться к категориям *Технологии* или *Игрушки*, что будет искажать результаты. Региональные ограничения - тренды США и ЕС часто доминируют в глобальной выборке, тогда как азиатские рынки требуют отдельного анализа.

1. Машиностроение (Mechanical Engineering).

- *бизнес и промышленность*: умеренный интерес с пиками в 2012–2015 гг. (идёт развитие промышленности в Азии) и спадом после 2020 г. (фокус смещается на цифровизацию). В этот период Китай, Индия и страны АСЕАН активно развивали промышленность (например, программа «Сделано в Китае 2025»). Запросы типа «станки ЧПУ» или «автоматизация заводов» росли. После 2020 года интерес сместился на цифровые двойники и IoT, что не всегда попадает в категорию «машиностроение»;

- *работа и образование*: стабильный спрос на обучение, особенно в Индии и Германии. Пики связаны с запуском определённых образовательных программ по машиностроению. Машиностроение остается базовой инженерной специальностью. В Индии и Германии высокий спрос на курсы (например, «Mechanical Engineering courses»);

- *финансы*: низкая активность. Всплески совпадают с новостями о государственных инвестициях (например, «Сделано в Китае 2025»);

- *покупки*: минимальный интерес, так как запросы связаны с оборудованием, обычно B2B.

Машиностроение в России

- *бизнес и промышленность*: пики 2012–2014 (модернизация заводов), 2022–2023 (импортозамещение после санкций). Запросы: «станки с ЧПУ Россия», «отечественное машиностроение»;

- *работа и образование*: стабильный интерес. Максимум в 2023 г. (запросы «курсы механика СПб», «вакансии инженера-конструктора»);

- *финансы*: почти нет активности, кроме 2020 г. («акции КамАЗа»);

- *покупки*: минимальный интерес.

Специфика: регионы-лидеры Москва, Свердловская обл., Татарстан (центры ВПК и автопрома).

2. Робототехника (Robotics)

- *бизнес и промышленность*: резкий рост с 2015 г. связан с внедрением Industry 4.0 (умные фабрики, коллаборативные роботы). Пик в 2020–2022 гг. связан с пандемией COVID-19 и спросом на бесконтактные решения. Запросы «роботы для дезинфекции» выросли на 450% в 2020–2021 гг;

- *работа и образование*: устойчивый рост. Лидеры – Южная Корея, Япония. Курсы по AI/робототехнике популярны на платформах для онлайн-обучения с платным и бесплатным контентом Coursera и edX;

- *финансы*: интерес связан с инвестициями в стартапы (например, Boston Dynamics). Пики в 2016–2018 гг;

- *покупки*: нишевой спрос на потребительских роботов (роботы-пылесосы, дроны). Сезонные пики в преддверии Black Friday и Нового года. B2B-запросы (например, «промышленные роботы Kawasaki») относятся к категории Бизнес.

Робототехника в России

- *бизнес*: рост с 2020 г. (+120% к 2023). Причина – санкции и спрос на автоматизацию. Запросы «промышленные роботы Россия», «роботы для склада»;

- *образование*: взрывной рост с 2022 г. («курсы по робототехнике онлайн» +400%);

- *покупки*: нишевой спрос на дроны (пик в 2023 г. – «купить квадрокоптер с доставкой»).

Специфика: санкции подтолкнули разработки в ВПК и логистике (например, дроны «Орлан»).

3. Аддитивное производство (Additive Manufacturing / 3D Printing).

- *бизнес и промышленность*: пик 2013–2014 гг. – это ажиотаж вокруг «революции 3D-печати» в СМИ. Запросы «купить 3D-принтер» и «3D-печать домов» были на максимуме. Затем происходит стабилизация интереса и спад после 2015 г. Рынок потребительских 3D-принтеров насытился, а промышленные решения остались нишевыми. Новый рост происходит с 2020–2023 гг. (медицинские маски, вентиляторы). Автоиндустрия: запчасти для электромобилей (Tesla использует 3D-печать для деталей);

- *работа и образование*: рост запросов на курсы (+300% с 2015 г.). Лидеры – США, Германия;

- *финансы*: интерес к акциям компаний (Stratasys, 3D Systems). Инвесторы интересовались компаниями вроде Desktop Metal (пик в 2021 г., SPAC-инвестиции);

- *покупки*: спрос на домашние 3D-принтеры (пик в 2013–2015 гг.), затем спад из-за насыщения рынка.

Аддитивное производство в России

- 2013–2015: пик хайпа («купить 3D-принтер» +200%);

- 2016–2019: спад интереса из-за дороговизны материалов для печати;

- 2020–2024: новый рост. Запросы «3D-печать запчастей» (дефицит из-за санкций), «биопечать медицинских имплантов»;

Специфика: 70% запросов из Москвы и Подмосковья. Ключевые слова «3D-печать на заказ», «аддитивные технологии в строительстве».

4. Автомобильная промышленность (Automotive Industry)

- *бизнес и промышленность*: высокий интерес с колебаниями. Падение в 2020 г. (кризис поставок), рост в 2021–2023 гг. (электромобили EV как драйвер роста, Tesla);

- *работа и образование*: спрос на инженеров-электриков и IT-специалистов. Пики в 2022 г. (переход на EV). Сдвиг спроса объясняется переходом от традиционных авто к EV, что видно по запросам «работа инженера-аккумуляторщика»;

- *финансы*: хайп вокруг IPO Rivian (2021 г.) и ростом акций Tesla (на 700% в 2020–2021 гг.). Кризис 2020–2022 гг. связан с дефицитом чипов. Запросы «дефицит автозапчастей 2022» достиг максимума в мае 2022 г.

- *покупки*: цикличность (пики перед автосалонами и релизами новых моделей). Рост запросов на электромобили (+120% с 2019 г.). Запросы «купить электромобиль» выросли в 5 раз с 2019 г. (данные из ЕС и Китая).

Автомобильная промышленность в России.

Ключевые события и тренды:

- *образование*: «курсы по ремонту электромобилей» (+250% с 2022 г.);

- 2010–2019: запросы по брендам «купить Lada», «новые модели KIA»;

- 2022–2024: санкции привели к обвалу интереса к иностранным маркам «купить Mercedes» ↓90%.

Специфика: рост запросов «китайские автомобили» (+600%), «Евразия (бренд КамАЗа)». Регионы: Самарская обл. (АвтоВАЗ), Калининград (иномарки до 2022 г.).

Выводы.

1. На основании проведённого анализа нам видится, что главным драйвером роста в категориях *Машиностроение* и *Робототехника* в ближайшем будущем будет являться импортозамещение. В автопроме и 3D-оборудовании Россия переориентируется на Китай (запросы «JAC Россия», «3D-принтер Creality»).

2. Темы *Робототехники* и *Аддитивного производства* демонстрируют самый динамичный рост, особенно в категориях *Бизнес* и *Работа*. Тема *Автомобильной промышленности* трансформируется под влиянием электромобилей, что видно по категориям *Финансы* и *Покупки*. Тема *Машиностроения* остается стабильной, но постепенно пользователи теряют к ней интерес на фоне развития цифровых технологий. Пандемия COVID-19 ускорила интерес к автоматизации и 3D-печати.

3. В категории *Образование* замечено, что спрос на инженеров смещается в сторону наличия у них IT-навыков (CAD, программирование роботов). Поэтому в университетах необходимо развивать образовательные программы по робототехнике с упором на нужды и запросы ВПК.

4. На основе этих данных можно сформулировать ряд практических рекомендаций:

- инвесторам можно сфокусироваться на вложениях в робототехнику и EV-сектор;

- наёмным работникам необходимо осваивать навыки цифрового машиностроения (CAD/CAM/CAE-системы) и программирования промышленных роботов;

- частному бизнесу необходимо уже сейчас внедрять 3D-печать для снижения своей зависимости от зарубежных цепочек поставок и для ремонта импортной техники.

Литература:

1. Попов В.Ю., Рыбников А.С., Звядинцева С.Ю., Тимофеев Е.Н. Актуальность мировых машиностроительных трендов в 2021 году // Механики XXI века. 2021. № 20. С. 103-110.
2. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Рычков Д.А. Мониторинг актуальности технологических исследований по его ключевым словам // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 2. С. 55-58.
3. Попов В.Ю., Янюшкин А.С. «Ключевая» популярность электроалмазной обработки // Механики XXI века. 2016. № 15. С. 50-57.
4. Burguet, R., Caminal, R., Ellman, M. In Google we trust? // International Journal of Industrial Organization. 2015. 39. P. 44-55.
5. Chen, Yongmin and Chuan He. Paid Placement: Advertising and Search on the Internet // The Economic Journal, 2011. 121(556). P. F309-F328.
6. Preis, T., Moat, H.S., Stanley, H. Quantifying trading behavior in financial markets using Google Trends // Sci Rep, 2013. 3. P. 1684.

Relevance of global engineering trends in 2025

Popov V.Y.^{1,a}, Kazakov E.G.^{1,b}, Abramovich O.P.^{1,c}, Zikirloev U.Sh.^{1,d},
Revenko N.I.^{1,e}

¹Bratsk State University, Makarenko, 40, Bratsk, Russia

^aslapopov@gmail.com

Keywords: mechanical engineering, robotics, 3D printing, 3D CAD, automotive industry, relevance, Google Trends.

The article analyzes interest in the Mechanical Engineering, Robotics, Additive Manufacturing, and Automotive industries using Google Trends over the past 15 years (2010–2025) taking into account the categories Business and Industry, Work and Education, Shopping, and Finance, and shows the following trends.

It was determined that global interest in the Mechanical Engineering industry peaked in 2012–2015 (development of Asia), then shifted to digitalization. In Russia, growth is associated with modernization (2012–2014) and import substitution (2022–2023).

In the Robotics category, there has been growth since 2015 due to Industry 4.0, with a peak in 2020–2022. In the Russian Federation, interest in industrial robots has been growing since 2020 (sanctions, military-industrial complex, drones, online courses).

In the Additive Manufacturing category, the peak was in 2013–2014 (3D printing hype), then a decline due to market saturation, and a revival since 2020 (medicine, auto parts). In the Russian Federation, there is an increase in requests for «3D printing of spare parts» (due to a shortage).

In the Automotive Industry category, the topic of electric vehicles (EV) is popular as a growth driver. In the Russian Federation, since 2022, there has been a collapse in interest in foreign cars (-90% «Mercedes»), but growth in Chinese cars (+ 600%).

It has been determined that sanctions and import substitution have increased demand for domestic technologies, the transition to EVs and Chinese cars has reformatted the market, and digitalization has shifted the emphasis in mechanical engineering.

УДК 621.9.02

Аналитический обзор современных производителей металлорежущих материалов и инструментов

Попов В.Ю.^{1,a}, Казаков Е.Г.^{1,b}, Абрамович О.П.^{1,c}, Зикирлов У.Ш.^{1,d},
Ревенко Н.И.^{1,e}

¹Братский государственный университет, ул.Макаренко 40, Братск, Россия

^aslapopov@gmail.com

Ключевые слова: твёрдые сплавы, керамика, керметы, сверхтвёрдые материалы, БРС, инструмент.

В статье проведён анализ российских и западных компаний, разработчиков металлорежущих материалов и инструмента.

Отмечено, что сегодня российский рынок ориентирован на импортозамещение и адаптацию советских технологий. Основу составляют традиционные материалы: твердые сплавы и быстрорежущие стали. Производители «Победит», СИЗ фокусируются на восстановлении производственных цепочек под санкционным давлением. Внедрение инноваций (нанокерамика, CBN) ограничено из-за недостатка финансирования НИР и медленного перехода на цифровизацию. Акцент делается на бюджетные решения для обрабатывающей промышленности, но качество часто уступает западным аналогам. Развиваются наноструктурированные материалы НИТУ «МИСиС», однако серийное применение редко.

Западный рынок сегодня технологически продвинут. Доминируют инновации (наносплавы, керамика с графеном, PCD), умные инструменты с IoT и аддитивные технологии. Лидеры Sandvik, Kennametal инвестируют до 8% выручки в НИР, обеспечивая быстрый цикл разработки (6–12 месяцев). Делают акцент на экологичность, биоразлагаемые СОЖ, рециклинг. Глобальные цепочки поставок и высочайшие стандарты качества (DIN, JIS) укрепляют их конкурентоспособность. Рынок автоматизирован Industry 4.0, цифровыми двойниками и ориентирован на премиум-сегмент с кастомизацией под задачи аэрокосмоса и медицины.

Введение. В современном машиностроении наиболее актуальными [1–3] металлорежущими материалами являются:

Твердые сплавы (карбиды вольфрама):

- основу составляют карбиды вольфрама (WC) с кобальтовой связкой;
- высокая твердость, износостойкость и термостойкость;
- применяются для сверл, фрез, токарных резцов, особенно при обработке сталей, чугуна и жаропрочных сплавов.

Керамические материалы:

- оксидная керамика (на основе Al_2O_3) – для высокоскоростной обработки чугуна и сталей;
- нитридная керамика (на основе Si_3N_4) – подходит для прерывистого резания и обработки жаропрочных сплавов;
- преимущества: термостойкость (до 1200°C), но ограниченная ударная вязкость.

Сверхтвёрдые материалы:

- кубический нитрид бора (КНБ, CBN) – для обработки закаленных сталей (HRC 45+) и труднообрабатываемых сплавов;
- поликристаллический алмаз (ПА, PCD) – используется для цветных металлов, композитов и алюминия с высоким содержанием кремния;

– отличаются исключительной износостойкостью, но дороги в производстве.

Быстрорежущая сталь (БРС, HSS):

– сохраняет актуальность для изготовления сложнопрофильных инструментов (например, метчиков, разверток) и при ударных нагрузках;

– модернизируется за счет легирования (Co, V) и покрытий.

Керметы (керамика + металл):

– композиты на основе карбидов титана (TiC) или нитрида титана (TiN) с металлической связкой;

– сочетают износостойкость керамики и вязкость металлов. Применяются для чистовой обработки.

Покрyтия для инструментов:

– TiN (нитрид титана), TiAlN (титан-алюминий-нитрид) – повышают твердость и термостойкость;

– DLC (алмазоподобные покрытия) – снижают трение, подходят для алюминия и меди;

– увеличивают срок службы инструмента до 3–5 раз.

Наноструктурированные материалы:

– инструменты с нанопокрyтиями или нанокомпозитной структурой (например, карбиды с наноразмерными зернами);

– обеспечивают повышенную прочность и точность обработки.

Методология исследований. Путём изучения в интернете доступной информации, актуальной на март 2025 года были проанализированы современные российские и западные компании, производители или разработчики металлорежущего инструмента. Основным требованием к ним было условие изготовления для промышленности, а также разных отраслей машиностроения различных комбинированных материалов и многослойных покрытий, которые бы могли максимизировать производительность и минимизировать износ металлорежущего инструмента [4, 5]. Поскольку на сегодняшний день это главные задачи для машиностроения, то отметим их более развёрнуто в таблице 1.

Таблица 1.

Причины высоких требований к современному металлорежущему инструменту

Экономическая эффективность	Снижение затрат на инструмент: частая замена изношенных резцов, фрез или сверл увеличивает расходы на покупку новых и остановку оборудования. Минимизация износа сокращает эти затраты.	Увеличение выработки: высокая производительность позволяет быстрее изготавливать детали, выполняя больше заказов за меньшее время.
Качество продукции	Точность обработки: изношенный инструмент вызывает погрешности в размерах и шероховатость поверхности. Своевременная замена или использование износостойких материалов сохраняют геометрическую точность.	Снижение брака: дефекты из-за затупления кромок (например, заусенцы, трещины) ведут к переделкам и потерям материалов.
Энергоэффективность	Сокращение энергопотребления: изношенный инструмент требует больше усилий для резания, что повышает нагрузку на станок и расход электроэнергии.	Оптимизация режимов резания: высокая производительность достигается за счет правильных скоростей и подач, что снижает энергозатраты на единицу продукции.

Безопасность и надежность	Предотвращение аварий: сильно изношенные инструменты могут сломаться во время работы, повредив заготовку, станок или травмируя оператора.	Стабильность процесса: минимизация износа обеспечивает предсказуемость работы оборудования, снижая риск внеплановых простоев.
Экологичность	Сокращение отходов: реже заменяемые инструменты уменьшают количество металлолома и расходы на утилизацию.	Экономия ресурсов: меньший износ снижает потребность в производстве новых инструментов, что сохраняет сырье (вольфрам, кобальт и др.).
Конкурентные преимущества	Скорость выполнения заказов: высокая производительность позволяет быстрее реагировать на запросы рынка.	Рентабельность: оптимизация «стоимость инструмента / срок его службы» повышает маржинальность производства.

Результаты поиска российских и западных компаний.

Твердые сплавы:

- АО «Победит» (Владикавказ): выпускает сплавы серий ВК – для обработки чугуна, цветных металлов и сплавов, для ударных нагрузок); ТК – для обработки сталей);
- Московский завод «Твердые сплавы»: производит марки ВКЗ-М, ТТ7К12 для резцов и фрез;
- Sandvik (Coromant): GCxxxx – для сталей, нержавейки, титана; Нхх – для чугуна;
- Kennametal: KCPxx – универсальные сплавы; KCUxx – для обработки цветных металлов;
- Iscar: ICxx – для высокопроизводительного резания.

Керамические материалы:

- НИТУ «МИСиС» (Москва): инновационные керамические композиты; КО-90 – термостойкая керамика; ЦМ-332 – для высокоскоростной обработки чугуна;
- ВНИИНМ (Москва): материалы на основе нитрида кремния (аналоги Si₃N₄);
- Sandvik: CC670 – оксидная керамика (Al₂O₃) для чистовой обработки чугуна; KYON 2000 (Ceratzit) – для высоких скоростей; CC6060 – нитридная керамика (Si₃N₄) для прерывистого резания;
- Kennametal: KY1540 – для жаропрочных сплавов.

Сверхтвердые материалы:

- АО «Томал» (Томск): алмазные и КНБ-инструменты; АСПК (алмазные зерна) – для шлифовки и резки цветных металлов; КНБ-М (кубический нитрид бора) – аналог CBN для закаленных сталей;
- Новосибирский завод искусственных кристаллов: синтетические алмазы;
- Sandvik: CB70 – кубический нитрид бора (CBN) для закаленных сталей (HRC 60+); Kennametal KBH10 – для прецизионной обработки; Element Six BZN – промышленные пластины; CD10 – поликристаллический алмаз (PCD) для алюминия с кремнием; Element Six DAxxx – для композитов.

Быстрорежущая сталь:

- ОМЗ-Спецсталь (Санкт-Петербург): производство быстрорежа; P6M5K5 (с кобальтом) – для повышенных температур. P6M5 (аналог HSS M2) – универсальная сталь для сверл, фрез;
- Электростальский завод (Моск. обл.): легированные стали;
- Bohler (Uddeholm): S390, S790 – порошковые HSS с износостойкими покрытиями.

Керметы:

- ВНИИТС (Всероссийский НИИ твердых сплавов): композиты на основе TiC; TT20K9 (карбид титана + никель-молибден) – для чистовой обработки; BT20 (вольфрам-титановые керметы) – для резки сталей;
- Kennametal: KCM05B – для чистовой обработки сталей;
- Sandvik: CTxx – композиты TiCN + металл;
- Mitsubishi Materials: TXxx – высокая стойкость к окислению.

Покрyтия:

- инструменты от «Инструм-РЭНД»: TiN (нитрид титана) наносится методом PVD;
- МИФИ и МГТУ им. Баумана: TiAlN;
- НПП «ИЗАН» (Истра): установки для нанесения износостойких покрытий;
- Balzers: BALINIT A – базовое износостойкое покрытие из TiN (нитрид титана);
- IHI Ionbond: ALTiNa – для высоких температур, покрытие из TiAlN (титан-алюминий-нитрид);
- CemeCon: CCDia – алмазоподобные покрытия (DLC);
- Plaitit: $\pi 311$ – для обработки титана и жаропрочных сплавов, покрытие из AlCrN (алюмохромид).

Наноструктурированные материалы:

- ИФТТ РАН (Черноголовка): нанокompозитные сплавы для режущих кромок;
- НИТУ «МИСиС»: инструменты с нанопокрyтиями на основе алмазоподобных пленок;
- Sandvik NanoFlex – инструменты с нанопокрyтиями;
- Mitsubishi Materials VP15TF – нанокompозитные пластины для авиационных сплавов;
- Seco Tools Duratomic® – технология наноструктурированного оксида алюминия.

Ключевые различия российских и западных компаний.

Инновации: Запад – драйвер технологий; Россия – догоняющая модернизация.

Экспорт: у западных компаний – 60–80% выручки; у российских – менее 30%.

Экологичность: на Западе – приоритет; в России – второстепенно.

Скорость: западные решения внедряются в 3–5 раз быстрее.

Выводы.

1. Максимизация производительности и минимизация износа – это не просто технические задачи, а стратегические факторы, влияющие на прибыль, качество, экологию и репутацию предприятия.
2. Современные технологии [6–10] и материалы позволяют находить оптимальный баланс между этими параметрами, который заключается в следующем:
 - использовать современные материалы [11–14]: твердые сплавы (BK8, T15K6), керамика, CBN, PCD; износостойкие покрытия (TiAlN, AlCrN);
 - вложить часть средств в оптимизацию режимов резания: например, подбор скорости, подачи и глубины резания под конкретный материал;
 - активно использовать системы охлаждения и смазки (СОЖ): т.к. они уменьшают температуру в зоне резания, продлевая жизнь инструменту.
 - вести активный мониторинг состояния инструмента: например, использовать датчики износа, IoT-решения для своевременной замены инструмента.

Литература:

1. Burguet, R., Caminal, R., Ellman, M. In Google we trust? // International Journal of Industrial Organization. 2015. 39. P. 44-55.
2. Chen, Yongmin and Chuan He. Paid Placement: Advertising and Search on the Internet // The Economic Journal, 2011. 121(556). P. F309-F328.
3. Preis, T., Moat, H.S., Stanley, H. Quantifying trading behavior in financial markets using Google Trends // Sci Rep, 2013. 3. P. 1684.

4. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Архипов П.В. Потеря режущей способности алмазных кругов на металлической связке при шлифовании композиционных материалов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2013. № 1 (47). С. 178-183.
5. Jiang J.L., Ge P.Q., Bi W.B., Zhang L., Wang D.X., Zhang Y. 2D/3D Ground Surface Topography Modeling Considering Dressing and Wear Effects in Grinding Process // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2013. V. 74. P. 29-40.
6. Попов В.Ю., Шкуратова А.П., Хлыстов А.Н., Бондин А.В., Мирошниченко Н.А. 3D моделирование процесса комбинированной электроалмазной обработки // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. С. 201–207.
7. Попов В.Ю., Ларева А.П., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Моделирование процесса комбинированной электроалмазной обработки в среде Blender 3D // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2015. Т. 1. С. 187–191.
8. Попов В.Ю., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Молекулярно-динамическое моделирование ювенильных поверхностей // Механики XXI века. 2015. № 14. С. 103–107.
9. Попов В.Ю. Шероховатость поверхности быстрорежущего инструмента в зависимости от режимов электроалмазной обработки // Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. № 2. С. 21–26.
10. Shashkov Y., Gusarov A., Gushchin V., Tumarkin S. Comparative analysis of finishing methods of hardened steel surfaces // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. V. 102. P. 9-12.
11. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Дефекты в алмазах - основа адгезии при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. №5 (74). С. 16-23.
12. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Хлыстов А.Н. Разрушение алмазных зерен при шлифовании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2016. № 4 (73). С. 16-23.
13. Popov V.Yu., Arkhipov P.V., Rychkov D.A. Adhesive wear mechanism under combined electric diamond grinding / ICMTMTE 2017 MATEC Web of Conferences 129 (2017), 01002.
14. Скрипняк Е.Г., Лобанов Д.В., Скрипняк В.В., Янюшкин А.С., Скрипняк В.А., Рычков Д.А. Керамические наноккомпозиты на основе диборида циркония // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 2 (10). С. 95-98.

Analytical review of modern manufacturers of metal cutting materials and tools

Popov V.Y.^{1,a}, Kazakov E.G.^{1,b}, Abramovich O.P.^{1,c}, Zikirloev U.Sh.^{1,d},
Revenko N.I.^{1,e}

¹Bratsk State University, Makarenko, 40, Bratsk, Russia

^aslapopov@gmail.com

Keywords: hard alloys, ceramics, cermets, superhard materials, HSS, tool.

The article analyzes Russian and Western companies that develop metal-cutting materials and tools.

It is noted that today the Russian market is focused on import substitution and adaptation of Soviet technologies. The basis is traditional materials: hard alloys and high-speed steels. Manufacturers of Pobedit, SIZ focus on restoring production chains under sanctions pressure. The introduction of innovations (nanoceramics, CBN) is limited due to lack of funding for R&D and a slow transition to digitalization. The emphasis is on budget solutions for the manufacturing industry, but the quality is often inferior to Western counterparts. Nanostructured materials of NUST MISIS are developing, but serial use is rare.

The Western market is technologically advanced today. Innovations (nanoalloys, ceramics with graphene, PCD), smart tools with IoT and additive technologies dominate. Leaders Sandvik, Kennametal invest up to 8% of revenue in R&D, ensuring a fast development cycle (6-12 months).

They focus on environmental friendliness, biodegradable coolants, recycling. Global supply chains and the highest quality standards (DIN, JIS) strengthen their competitiveness. The market is automated by Industry 4.0, digital twins and is focused on the premium segment with customization for aerospace and medical tasks.

УДК 621.923.01

Применение цифровых двойников при создании элементов технологической оснастки для обработки абразивным потоком

Левко В. А.^{1,a}, Теряев Н. С.^{1,b}, Литовка О. В.^{1,c}, Иванов П. А.^{1,d},
Рыков А. Д.^{1,e}

¹Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М. Ф. Решетнева Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

^alevko@sibsau.ru

Ключевые слова: направляющий аппарат, технологическая оснастка, обработка абразивным потоком, аддитивные технологии, цифровой двойник

Отмечено, что для финишной обработки сложнопрофильных деталей с закрытыми каналами все чаще применяется обработка абразивным потоком. Установлено, что для выравнивания условий обработки абразивным потоком в качестве дополнительного элемента технологической оснастки используется направляющий аппарат. Предложено отнести производство элементов технологической оснастки для обработки абразивным потоком отнести к единичному типу. Рассмотрены основные направления по применению цифровых двойников при создании направляющих аппаратов, описаны их достоинства и недостатки. Предложен подход с использованием цифровых двойников аддитивных технологий (SLM и SLA) при создании элементов технологической оснастки, существенно повышающий технологичность конструкции этих элементов.

Модель, полученная на основе цифрового двойника, используется для создания оболочковой формы и дает возможность изготавливать направляющие аппараты с относительно невысокой себестоимостью в условиях единичного производства.

Введение. Для финишной обработки сложнопрофильных деталей с закрытыми каналами все чаще применяется обработка абразивным потоком (*abrasive flow machining (AFM)*) [1]. Однако при этом наблюдается неравномерность съема металла, особенно на входной кромке [2]. Эту неравномерность предложено выравнивать за счет применения направляющих аппаратов (элементов) [3-6]. Направляющий аппарат как элемент технологической оснастки играет важную роль в обеспечении равномерности обработки абразивным потоком закрытых каналов (рис. 1).

Верхняя часть приспособления 1 и нижняя часть приспособления 2, между которыми фиксируется обрабатываемая деталь 3, изготавливаются при помощи традиционных технологий лезвийной обработки и сварки. Направляющий аппарат 4 должен соответствовать ряду требований. Число каналов направляющего аппарата должно соответствовать количеству закрытых каналов детали. Выходные сечения каналов в направляющем аппарате должны иметь идентичные с сечением закрытых каналов детали форму и площадь сечения, а также угол входа в канал. При этом углы наклона каналов должны быть идентичными и иметь погрешность угловой установки 1-3°, а площадь поперечного сечения выходных сечений $S_{на}$ каналов направляющего аппарата может быть

меньшей площади поперечных сечений S_d каналов детали на величину упругого восстановления струи потока рабочей среды [7].

Проектирование направляющего аппарата для конкретных деталей является важной задачей [7]. Не менее важной является задача изготовления этого элемента технологической оснастки с учетом условий и типа производства. Как показывает практика, элементы технологической оснастки для АФМ имеет большой срок службы. Высокая стойкость поверхностей оснастки, которые в ходе обработки контактируют с потоком рабочей среды, обусловлена их постепенной приработкой до шероховатости $Ra \approx 0,1 \dots 0,2$ мкм и упрочнением в два – три раза, по сравнению с исходным состоянием. Это характерно для элементов оснастки как из любых видов сталей, так и сплавов алюминия.

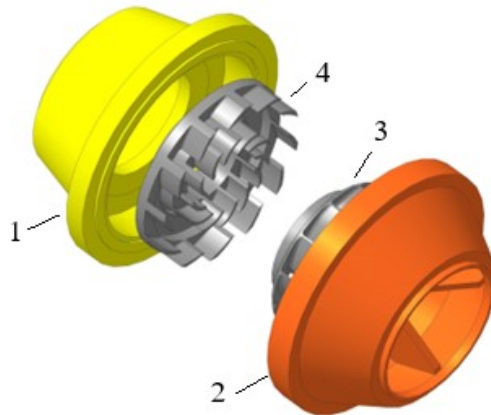


Рис. 1. Технологическая оснастка для абразивной обработки закрытых каналов с направляющим аппаратом [7]

Таким образом, производство элементов технологической оснастки для обработки абразивным потоком необходимо отнести к единичному типу.

Применение цифровых двойников при создании элементов технологической оснастки для обработки абразивным потоком. Цифровые двойники представляют собой виртуальные реплики реальных объектов, которые позволяют моделировать и симулировать их поведение в различных условиях [8], а их использование обеспечивает интеллектуализацию процессов подготовки высокотехнологичных производств [9].

Создание элементов технологической оснастки с применением цифровых двойников возможно по следующим направлениям: лезвийная обработка, электроэрозионная обработка, селективное лазерное сплавление (*Selective laser melting (SLM)*), литье по выплавляемым моделям и нанесение металлизующего покрытия на модель направляющего аппарата.

Общим этапом всех направлений является создание цифрового двойника технологической оснастки с последующим разбиением на цифровые двойники переходников и направляющего аппарата. 3D-модели разрабатываются в CAD-системе с учетом конструктивных особенностей и требований к детали и процессу обработки абразивным потоком. При этом особое внимание уделяется требованиям по точности размеров межлопаточных каналов направляющего аппарата. При этом точность присоединяемых поверхностей может быть исполнена по 12...14 квалитету.

При использовании лезвийной обработки для изготовления направляющего аппарата потребуются 4,5-осевая или 5-осевая обработка на обрабатывающих центрах. При этом исходный цифровой двойник перерабатывается с учетом требований системы разработки управляющих программ для станков с ЧПУ для последующей разработки цифрового двойника технологического процесса. Этот двойник содержит информацию о последовательности обработки, выбранных режущих инструментах и траекториях их движений, выбранных режимах резания. Это дает возможность провести визуализацию процесса обработки, а также совместить процесс резания и контроля получаемых размеров.

Рассматриваемый подход позволяет достаточно гибко организовать производство оснастки в условия единичного производства, но при этом потребует применения дорогостоящего оборудования и программного обеспечения, а также значительного штучного времени на обработку.

Аналогичными достоинствами и недостатками будет характеризоваться производство направляющих аппаратов с использованием электроэрозионной обработки. В этом случае дополнительно возникает необходимость изготовления специализированных электродов и постобработки присоединяемых поверхностей.

Селективное лазерное сплавление также потребует переработки исходного цифрового двойника детали. Этого требует оптимизация геометрии модели для минимизации дефектов и повышения качества изготовления. При этом цифровой двойник для аддитивного производства необходимо преобразовать в иной формат, поддерживаемый аддитивным оборудованием с учетом размещения 3D-модели на виртуальной платформе и ограничениями по размерам рабочей камеры.

В этот цифровой двойник необходимо ввести конструктивные элементы в виде поддержек детали для предотвращения ее деформаций, обеспечения геометрической точности, отвода избыточного тепла, обеспечения адгезии к платформе и облегчения удаления после печати. Детали, полученные технологией *SLM*, требуют постобработки и создания соответствующего цифрового двойника.

Высокая стоимость оборудования и расходных материалов, длительное время печати и низкое качество напечатанных деталей — вот некоторые из факторов, препятствующих широкому применению 3D-печати металлических деталей [10]. В перспективе эта технология может стать основной для создания специализированной технологической оснастки для обработки абразивным потоком, однако в настоящее время для условий единичного производства эффективнее отдавать изготовление направляющих аппаратов специализированным компаниям.

Известно, что технология лазерной стереолитографии (*Stereolithography (SLA)*), заключающаяся в отверждении жидкого фотополимерного материала под действием лазерного излучения, на основе цифрового двойника дает возможность построения моделей сложной формы и структуры, при этом полученные модели отличаются высокой прочностью и точностью, хорошим качеством поверхности и характеризуются несложной постобработкой [11].

Использование *SLA*-технологии дает возможность быстро изготовить самые точные литьевые изделия из металла с наилучшим качеством поверхности по сравнению с другими технологиями. Напечатанная 3D-модель покрывается жаропрочной суспензией в несколько слоев для создания оболочковой формы. Далее модель выжигается при высокой температуре и на ее место заливается расплавленный металл. После отверждения металла, оболочка удаляется и проводятся финишные операции по отделке уже готовой отливки из металла [12].

Цифровой двойник направляющего аппарата для *SLA*-технологии может стать исходной моделью и для нанесения металлизированного покрытия [13]. Основными методами металлизации, которые используются в настоящее время, являются электроосаждение [14] и химическое осаждение [15]. Проведенные эксперименты по химической металлизации оправок и формированию функционального слоя пресс-форм, посредством гальванического выращивания позволили получить технологическую оснастку с использованием прототипированных оправок [16]. Однако небольшая толщина нанесенного слоя делает дискуссионной перспективу использования данной технологии для изготовления элементов технологической оснастки для *AFM*.

Предложенный подход с применением цифровых двойников при создании элементов технологической оснастки для *AFM* существенно повышают технологичность конструкции этих элементов, сокращают сроки подготовки производства. Использование аддитивных

технологий (*SLM* и *SLA*) дает возможность изготавливать направляющие аппараты с относительно невысокой себестоимостью в условиях единичного производства.

Выводы. Повышение эффективности технологии изготовления элементов технологической оснастки для обработки абразивным потоком на основе применения цифровых двойников и аддитивных технологий позволят существенно расширить технологические возможности технологии *AFM* как для сложнопрофильных деталей с закрытыми каналами, так и для других деталей.

Литература:

1. Совершенствование технологии обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей / В. А. Левко, Н. С. Теряев, О. В. Литовка, П. А. Иванов // Металлообработка. – 2023. – № 3(135). – С. 3-12. – DOI 10.25960/mo.2023.3.3. – EDN HYPSPFW.
2. Обеспечение точности расхода компонентов топлива через каналы деталей, обработанных экструзионным хонингованием / С. К. Сысоев, А. С. Сысоев, В. А. Левко [и др.] // Технология машиностроения. – 2007. – № 6. – С. 48-52. – EDN KNNNLT.
3. Авторское свидетельство № 1161359 А1 СССР, МПК В24С 1/08. Способ обработки деталей абразивной массой : № 3652014 : заявл. 11.07.1983 : опубл. 15.06.1985 / С. К. Сысоев, М. А. Лубнин ; заявитель ПРЕДПРИЯТИЕ П/Я Г-4778. – EDN AFEFTU.
4. Fu, Y., Wang, X., Gao, H. et al. Blade surface uniformity of blisk finished by abrasive flow machining. *Int J Adv Manuf Technol* 84, 1725–1735 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8270-0>
5. Обработка абразивным потоком высоковязкой рабочей среды образцов литых заготовок из аустенитно-мартенситной стали / В. А. Левко, Н. С. Теряев, О. В. Литовка, П. А. Иванов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2023. – Т. 22, № 3. – С. 122-132. – DOI 10.18287/2541-7533-2023-22-3-122-132. – EDN UCYFHO.
6. Методика оценки точности, качества и эффективности абразивно-экструзионной обработки деталей / В. А. Левко, М. А. Лубнин, С. К. Сысоев [и др.] // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2011. – № 4(37). – С. 173-178. – EDN OXPSXL.
7. Направляющий аппарат как элемент технологической оснастки для обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей / Н. С. Теряев, В. А. Левко, О. В. Литовка, П. А. Иванов // Механики XXI века. – 2024. – № 23. – С. 234-239. – EDN SJVBVA.
8. Пономарев, К. С. Цифровой двойник как инструмент цифровой трансформации предприятия / К. С. Пономарев, М. А. Шутиков, А. Н. Феофанов // Вестник МГТУ "Станкин". – 2019. – № 4(51). – С. 19-23. – EDN BMYPOQ.
9. Бильданов, Р. Г. Интеллектуализация процессов подготовки высокотехнологичных производств / Р. Г. Бильданов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 9. – С. 451-458. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-9-446-447. – EDN VOXQNT.
10. DebRoy, T., Mukherjee, T., Milewski, J.O. et al. Scientific, technological and economic issues in metal printing and their solutions. *Nat. Mater.* 18, 1026–1032 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41563-019-0408-2>
11. Аддитивные технологии в производстве изделий аэрокосмической техники : Учебное пособие / Н. В. Коберник, А. С. Филимонов, А. Л. Галиновский, Е. С. Голубев. – 1-е изд.. – Москва : Издательство Юрайт, 2020. – 1 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-12043-1. – EDN WSVLOI.
12. Косушкин, П. Новые возможности литейного производства с применением промышленных 3D-принтеров / П. Косушкин // Литейщик России. – 2017. – № 9. – С. 40-42. – EDN ZHEOLX.
13. Металлизация методом магнетронного напыления пластин из пластика, изготовленных на 3D-принтере / В. А. Семенов, С. В. Работкин, А. С. Гренадеров [и др.] // *Materials. Technologies. Design.* – 2023. – Т. 5, № 3(13). – С. 61-70. – DOI 10.54708/26587572_2023_531361. – EDN ANENNH.
14. Filonov D., Kolen S., Shmidt A., Shacham-Diamand Y., Boag A., Ginzburg P. Volumetric 3D-Printed Antennas, Manufactured via Selective Polymer Metallization // *Phys. Status Solidi RRL Rapid Res. Lett.* 2019. V. 13, Iss. 6. DOI: 10.1002/pssr.201800668.
15. Lammel P., Whitehead A. H., Simunkova H., Rohr O., Gollas B. Droplet erosion performance of composite materials electroplated with a hard metal layer // *Wear.* 2011. V. 271, Iss. 9–10. P. 1341–1348. DOI: 10.1016/j.wear.2010.12.034.

16. Любимов, В. В. Технология изготовления технологической оснастки с применением прототипированных оправок / В. В. Любимов, Д. Г. Пермяков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 7-2. – С. 272-285. – EDN RNKKYZ.

Application of digital twins in creating elements of technological fixture for abrasive flow machining

Levko V. A.^{1,a}, Teryaev N. S.^{1,b}, Litovka O. V.^{1,c}, Ivanov P. A.^{1,d}, Rykov A. D.^{1,e}

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

^alevko@sibsau.ru

Keywords: guide device, technological fixture, abrasive flow machining, additive technologies, digital twin

It is noted that in order to equalize the conditions of abrasive flow machining, a guide device is used as an additional element of the technological fixture. It is noted that abrasive flow machining is increasingly used for finishing complex-profile parts with closed channels. It is established that a guide device is used as an additional element of the technological fixture to equalize the conditions of abrasive flow machining. It is proposed to classify the production of elements of technological fixture for abrasive flow machining as a single type. The main directions of using digital twins in the creation of guide vanes are considered, and their advantages and disadvantages are described. An approach is proposed using digital twins of additive technologies (SLM and SLA) in the creation of technological fixture elements, which significantly increases the manufacturability of the design of these elements. The model obtained on the basis of the digital twin is used to create a shell mold and makes it possible to manufacture guide vanes at a relatively low cost in a single-piece production environment.

УДК 621.923.01

Повышение производительности обработки абразивным потоком образцов из порошкового молибдена за счет использования рабочей среды нового состава

Литовка О. В.^{1,a}, Левко В.А.^{1,b}, Иванов П. А.^{1,c}

¹Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М. Ф. Решетнева Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

^alitovka.9518@gmail.com

Ключевые слова: сплав порошкового молибдена, рабочая среда, обработка абразивным потоком, алмазная паста

Рассмотрен современный уровень обработки абразивным потоком образцов из порошкового молибдена. Определены основные недостатки, обусловленные невысокой производительностью обработки, а также недостаточным сроком службы рабочей среды и ее стойкостью к термическому старению. Рекомендовано для повышения производительности обработки использовать рабочую среду нового состава, содержащую в определенных пропорциях мазеобразную алмазную пасту. Отмечено использование специальной технологии смешения компонентов рабочей среды в правильных пропорциях,

которые бы создавали требуемое сочетание вязкоупругих и пластических свойств потока среды с необходимой когезионной прочностью, а также имели более высокую температурную стойкость и срок службы. Проведена экспериментальная обработка абразивным потоком образцов, позволившая уменьшить шероховатость поверхности до $Ra = 0,9 \dots 1,0$ мкм и повысить производительность обработки на 87,5%.

Введение. В современном производстве для изготовления вставок критических сечений, сопловых насадок ракетных двигателей, для изготовления деталей и узлов ионных и плазменных двигателей, различных видов турбин все большее применение находят сплавы хрома, кобальта, титана, и молибдена. Эти материалы способны не терять свои эксплуатационные свойства при высоких температурах, близких к их температурам плавления, быть стойкими к различным агрессивным средам, а также обладать высокой износостойкостью [1]. Для ряда заготовок из молибденовых сплавов требуется дополнительная финишная обработка их внутренних поверхностей. Как правило, это труднодоступные поверхности и доработка подобных поверхностей традиционными методами лезвийной и абразивной обработки затруднена. В настоящее время для этих целей все большее применение получают нетрадиционные методы финишной обработки, основанные на потоке рабочих сред, наполненных твердыми частицами, вступающими в контакт с неровностями поверхности при перемещении вдоль нее [2].

Так, в производстве полупроводниковой техники применяют способ финишной обработки абразивными зёрнами, прокачиваемыми в коллоидной жидкости. Эта жидкость представляет собой кислую водную среду (рН от 3 до 6), содержащую водорастворимый поверхностно активный материал и окислитель (перекись водорода) [3]. В этом решении механизм удаления материала можно классифицировать как разновидность комбинированной струйной абразивно-жидкостной обработки. Поток рабочей среды представляет собой низковязкую среду, способную к проявлению при течении в обрабатываемом канале лишь небольших упругих деформаций. Производительность обработки и величина шероховатости обработанной поверхности при этом не удовлетворяют требованиям [1].

Для обработки внутренних поверхностей любой геометрической формы применима технология обработки абразивным потоком (*abrasive flow machining (AFM)*) [4]. Сравнительный анализ эффективности технологий обработки абразивным потоком и гидроабразивной обработки внутренних каналов сложной геометрии показал, что *AFM* позволяет обеспечить равномерную обработку всей внутренней поверхности канала сложной формы с высоким качеством поверхности. Гидроабразивная обработка имеет преимущество при обработке наружных поверхностей, при которой возможно обеспечение постоянства расстояния и угла между соплом и обрабатываемой деталью [5].

Известно, что обработка абразивным потоком средой высокой вязкости (на основе каучука СКТ) заготовок из сплавов порошкового молибдена обеспечила уменьшение шероховатость поверхности с $Ra = 1,6 \dots 1,8$ мкм до $Ra = 1,2 \dots 1,3$ мкм за два этапа с общим количеством циклов 75 при давлении в системе 12 МПа. На первом этапе в результате обработки абразивным потоком высоковязкой средой на основе синтетического термостойкого высокомолекулярного каучука СКТ с добавлением электрокорунда нормального зернистостью F40 и давлением экструзии 12 МПа удалось получить шероховатость поверхности $Ra = 1,45 \dots 1,5$ мкм. На втором этапе использована высоковязкая рабочая среда, в которой использованы зёрна карбида кремния зернистостью F8. Величина давления экструзии – 12 МПа. Получена шероховатость поверхности заготовки $Ra = 1,2 \dots 1,3$ мкм [6].

Недостатком описанного выше состава рабочей среды является невысокая производительность обработки, а также недостаточный срок службы и стойкость к термическому старению. Необходимость проводить *AFM* в два этапа увеличивает

вспомогательное время обработки, направленное на замену рабочей среды в установке и извлечению рабочей среды предыдущего состава из обрабатываемой детали.

Целью исследований являлась апробация рабочей среды нового состава, разработанная для обработки деталей из труднообрабатываемых сплавов, а также сравнение полученных результатов с предыдущими данными.

Рабочая среда для обработки абразивным потоком деталей из труднообрабатываемых сплавов нового состава. Для исследования использованы образцы из порошкового молибдена. Поверхность образца получена электроэрозионной вырезкой проволокой (рис. 1).

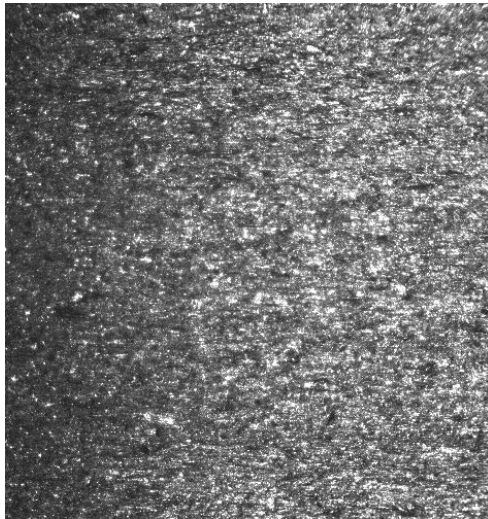


Рис. 1. Поверхность заготовки из порошкового молибденового сплава после электроэрозионной вырезки проволокой

Ее структура представлена сочетанием рисок и выступов. На поверхности рисок и выступов виден комплекс круглых микронеровностей, образованных частичками порошка молибдена. При этом риски и выступы имеют сглаженную форму со следами оплавления. Шероховатость поверхности после электроэрозионной вырезки проволокой составляет $Ra = 1,6 \dots 1,8$ мкм.

Целью создания нового состава рабочей среды было существенное увеличение производительности обработки за счет использования специальной технологии смешения в правильных пропорциях таких составляющих, которые бы создавали требуемое сочетание вязкоупругих и пластических свойств потока среды с необходимой когезионной прочностью, а также имели более высокую температурную стойкость и срок службы.

Известно, что жизненный цикл рабочей среды для обработки абразивным потоком включает в себя пять стадий, разделенных на тринадцать этапов. На основе анализа мирового опыта для каждого этапа предложен набор факторов, позволяющих дать характеристику обрабатываемой детали, рабочей среды, режимов обработки, а также контактных взаимодействий между абразивным зерном и обрабатываемой поверхностью [7].

На основе теоретических и лабораторных исследований [8-17] нами разработана рабочая среда для обработки абразивным потоком нового состава при следующих соотношениях компонентов, мас. %: каучук СКТ (ГОСТ 14680-79) – 40; алмазная мазеобразная паста (ГОСТ 25593-83) – 10; карбид кремния – 50.

Обработка абразивным потоком также проведена на установке УЭШ-100 при давлении в системе 12 МПа за один этап с общим количеством циклов 40. Количество циклов обработки было определено на основе модели контактных взаимодействий [18]. Исходная шероховатость поверхности была уменьшена до $Ra = 0,9 \dots 1,0$ мкм (рис. 2).

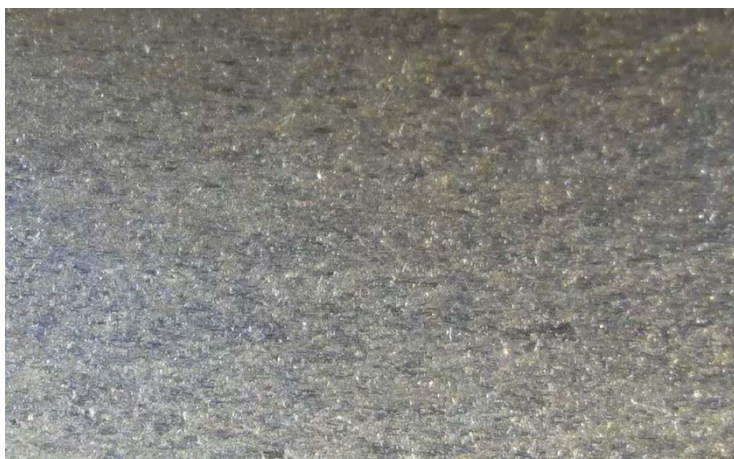


Рис. 2. Поверхность детали из порошкового молибденового сплава после обработки абразивным потоком

Структура поверхности стала более однородной. Микровыступы существенно сглажены, риски удалены. Температура рабочей среды в ходе обработки увеличилась с 22 до 37 С°, т.е. осталась в допустимом интервале значений. Сравнение результатов обработки показывает, что применение нового состава рабочей среды позволило повысить производительность АФМ образцов из порошка молибдена на 87,5%.

Таким образом для повышения производительности обработки и обеспечения требуемого сочетания вязкоупругих и пластических свойств потока рабочей среды с необходимой когезионной прочностью, а также увеличения ее температурной стойкости и срока службы, в ее состав введена мазеобразная алмазная паста, выступающая в качестве комплексного пластификатора, охлаждающего и стабилизирующего поверхностно-активного вещества. При этом алмазные зерна пасты участвуют в процессе обработки совместно с абразивными зернами карбида кремния, создавая сетчатую структуру потока рабочей среды с необходимой когезионной и температурной стойкостью. Для изготовления рабочей среды применена технология смешения компонентов рабочей среды при их многократном возвратно-поступательном движении через специальное приспособление при определенных температурах, деформациях и напряжениях сдвига, а также последующей выдержке.

Выводы. Использование нового состава рабочей среды, содержащего в определенных пропорциях мазеобразную алмазную пасту, позволило увеличить производительность обработки образцов из порошкового молибдена на 87,5%, а также ограничить степень нагрева рабочей среды до приемлемых температур. Рассмотренный состав рабочей среды рекомендуется для обработки абразивным потоком деталей из других труднообрабатываемых сплавов.

Литература:

1. Повышение эффективности технологии изготовления деталей из порошкового молибдена за счет уменьшения объема лезвийной обработки / О. В. Литовка, В. А. Левко, П. А. Иванов, В. И. Матвиенко // Механика XXI века. – 2024. – № 23. – С. 239-245. – EDN MRFPBH.
2. Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком внутренней поверхности заготовок из латунных сплавов / П. А. Иванов, В. А. Левко, О. В. Литовка, Л. П. Сысоева // Вестник МГТУ «Станкин». – 2023. – № 1(64). – С. 114–124. – DOI 10.47617/2072-3172_2023_1_114. – EDN APYBDX.
3. Mohammadian N., Turenne S., Brailovski V. Surface finish control of additively manufactured Inconel 625 components using combined chemical-abrasive flow polishing // Journal of Materials Processing Technology. 2018. Vol. 252. P. 728–738. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.10.020>.
4. Совершенствование технологии обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей / В. А. Левко, Н. С. Теряев, О. В. Литовка, П. А. Иванов // Металлообработка. – 2023. – № 3(135). – С. 3-12. – DOI 10.25960/mo.2023.3.3. – EDN HYPSPFW.

5. Иванов П. А., Левко В. А. Сравнительный анализ эффективности технологий обработки абразивным потоком и гидроабразивной обработки внутренних каналов сложной геометрии // Механики XXI века. – 2023. – № 22. – С. 100–103. – EDN RZETCB.
6. Левко, В. А. Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком средой высокой вязкости заготовок из сплавов порошкового молибдена / В. А. Левко, Д. И. Савин, О. В. Литовка // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24, № 1(150). – С. 36-51. – DOI 10.21285/1814-3520-2020-1-36-51.
7. Левко, В. А. Повышение эффективности обработки абразивным потоком за счет управления факторами жизненного цикла рабочей среды / В. А. Левко, А. Е. Симакова, Д. И. Савин // Сибирский журнал науки и технологий. – 2017. – Т. 18, № 4. – С. 932-938. – EDN YNZWAE.
8. Pawan Yadav, S.C. Jayswal, Study of Media in Abrasive Flow Machining and its Hybrid Processes. Materials Today: Proceedings. Volume 18, Part 7, 2019, Pages 3017-3026, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.173>.
9. Левко, В. А. Абразивно-экструзионная обработка полидисперсной рабочей средой / В. А. Левко, Д. О. Харин // Решетневские чтения. – 2013. – Т. 1. – С. 424-425. – EDN SJCKMX.
10. Fan, W., Sun, Y., Su, Q. et al. Wall-slip characteristics of viscoelastic abrasive medium in abrasive flow machining process. Int J Adv Manuf Technol 127, 253–261 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11552-5>
11. Aneesh Goyal, Harvinder Singh, Rachin Goyal, Rajdeep Singh, Swarn Singh. Recent advancements in abrasive flow machining and abrasive materials: A review. Materials Today: Proceedings. Volume 56, Part 5, 2022, Pages 3065-3072, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.109>.
12. Som Kumar, Karamjit Singh, B.S. Brar, Rakesh Kumar. Effect of processing condition on abrasive flow machining process: A review. Materials Today: Proceedings, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.237>.
13. Экспериментальное определение коэффициентов вязкости, упругости и пластичности рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке / П. А. Снетков, В. А. Левко, Е. Б. Пшенко, М. А. Лубнин // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2009. – № 4(25). – С. 134-138. – EDN KZTCCB.
14. Fu, Y., Gao, H., Yan, Q. et al. Rheological characterisation of abrasive media and finishing behaviours in abrasive flow machining. Int J Adv Manuf Technol 107, 3569–3580 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05288-9>
15. E. Uhlmann, M. Doits, C. Schmiedel. Development of a Material Model for Visco-elastic Abrasive Medium in Abrasive Flow Machining. Procedia CIRP, Volume 8, 2013, Pages 351-356, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.115>.
16. Левко, В. А. Влияние состава рабочей среды на технологические режимы абразивно-экструзионной обработки сложнопрофильных деталей / В. А. Левко, Е. Б. Пшенко // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2006. – № 4(11). – С. 64-68. – EDN INMCBX.
17. Jain, V. K., Ranganatha, C., & Muralidhar, K. (2001). EVALUATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF MEDIUM FOR AFM PROCESS. Machining Science and Technology, 5(2), 151–170. <https://doi.org/10.1081/MST-100107841>
18. Nitin Dixit, Varun Sharma, Pradeep Kumar. Research trends in abrasive flow machining: A systematic review. Journal of Manufacturing Processes. Volume 64, 2021, Pages 1434-1461, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.009>.
19. Mangesh, G.S., Misra, A. Analysis of Flow of Viscoelastic Abrasive Medium and Finishing Forces in Two-Way AFM. J. Inst. Eng. India Ser. C 104, 733–742 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40032-023-00948-7>
20. Левко, В. А. Расчет шероховатости поверхности при абразивно-экструзионной обработке на основе модели контактных взаимодействий / В. А. Левко // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2009. – № 1. – С. 59-62. – EDN KPYIYX.

Increasing the productivity of abrasive flow machining of powder molybdenum samples by using a media of new composition

Litovka O. V.^{1,a}, Levko V.A.^{1,b}, Ivanov P. A.^{1,c}

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
^alitovka0.9518@gmail.com

Keywords: powder molybdenum alloy, cutting, electrical discharge machining, abrasive flow machining, electrochemical machining

The modern level of abrasive flow machining of powder molybdenum samples is considered. The main disadvantages caused by low machining productivity, as well as insufficient service life of the medium and its resistance to thermal aging are identified. The use of a special technology for mixing the components of the working medium in the correct proportions, which would create the required combination of viscoelastic and plastic properties of the medium flow with the necessary cohesive strength, and also have a higher temperature resistance and service life, is noted. It is recommended to use a new working medium containing a paste-like diamond paste in certain proportions to increase machining productivity. Experimental abrasive flow machining of samples was carried out, which made it possible to reduce the surface roughness to $Ra = 0.9...1.0 \mu m$ and increase the machining productivity by 87.5%.

УДК 621.923.01

Разработка рекомендаций по отделочно-упрочняющей обработке крыльчаток из алюминиевых сплавов на основе анализа современного уровня обработки абразивным потоком

Сысоева Л. П.^{1,a}, Левко В. А.^{1,b}, Иванов П. А.^{1,c}

¹Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М. Ф. Решетнева Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

^asysoeva.tms@mail.ru

Ключевые слова: алюминиевый сплав, отделочно-упрочняющая обработка, обработка абразивным потоком, крыльчатка

Крыльчатки из алюминиевых сплавов находят все большее применение в производстве насосной, компрессорной, транспортной и аэрокосмической техники. Отмечено, что сдерживающим фактором их широкого использования является невысокая стойкость к сопротивлению усталости. Для повышения качества поверхностного слоя и сопротивления усталости заготовок из алюминиевых сплавов используются различные методы поверхностного пластического деформирования и отделочно-упрочняющей обработки. Анализ современного уровня обработки абразивным потоком заготовок из алюминиевых сплавов показал, что данная технология может уменьшить шероховатость до $Ra = 0,32-0,5$ мкм и повысить микротвердость до 150-160 HV (до 200 HV для сплавов типа $AlSi7Mg0,6$ и $AlSi10Mg$) поверхностей закрытых (полузакрытых) каналов. Приведены результаты исследований по обработке абразивным потоком заготовок из алюминиевых сплавов. Разработаны рекомендации по отделочно-упрочняющей обработке крыльчаток из алюминиевых сплавов. Эти рекомендации включают в себя анализ исходной информации о геометрических характеристиках крыльчатки и выбор схемы обработки, а также состава рабочей среды как абразивного или упрочняющего инструмента.

Введение. В настоящее время в производстве насосной, компрессорной, транспортной и аэрокосмической техники все большее применение находят алюминиевые

сплавы в качестве замены различным видам сталей. Благодаря своим весовым характеристикам и относительно невысокой себестоимости детали из алюминиевых сплавов уменьшают общий вес изделий и уменьшают энергозатраты при эксплуатации. К таким деталям относятся рабочие колеса (крыльчатки, импеллера), винты, корпуса, крышки, кронштейны, оси, скобы, диски, рамы, фланцы, плиты, трубы, профили, волноводы и др.

Однако условия эксплуатации подобных деталей, как правило, подразумевает высокие знакопеременные нагрузки, ведущие к усталостному разрушению. Известно, что в системах терморегулирования космических аппаратов именно алюминиевая крыльчатка насоса является наиболее проблемным элементом, который может первым выйти из строя [1]. Одной из наиболее распространенной неисправностью электрических помп и механических насосов является выход из строя рабочего колеса (крыльчатки) [2]. Поэтому для повышения качества поверхностного слоя и сопротивления усталости заготовок из алюминиевых сплавов используются различные методы поверхностного пластического деформирования и отделочно-упрочняющей обработки.

Так крыльчатки из алюминиевых сплавов подвергают глубокому анодированию [3]. Для повышения износостойкости поверхности деталей из алюминиевых сплавов используют такие методы как микродуговое оксидирование [4], динамическое канально-угловое прессование [5], искровое упрочнение [6], лазерная обработка [7] и др. Однако все эти методы дают приемлемые результаты при обработке наружных открытых поверхностей. Так как данные сплавы термически не упрочняются, проблема упрочнения внутренних поверхностей деталей из алюминиевых сплавов, в том числе термически не упрочняемых из алюминивно-магниевого группы, в настоящее время полностью не решена.

В последнее время все большее применение находит такой метод как обработка абразивным потоком (*Abrasive Flow Machining (AFM)*) [8]. В настоящее время накоплен достаточный опыт экспериментальных и теоретических исследований в этой области как в нашей стране [9], так и за рубежом [10]. Особое место в этих исследованиях занимает обработка заготовок из алюминиевых сплавов.

Целью данных исследований являлась разработка рекомендаций по обработке абразивным потоком рабочих колес из алюминиевых сплавов на основе анализа современного уровня разработок в области обработки абразивным потоком заготовок из алюминиевых сплавов.

Современный уровень обработки абразивным потоком заготовок из алюминиевых сплавов. Анализ результатов предыдущих исследований процесса *AFM* показал, что одновременно со снятием материала с обрабатываемой поверхности происходит и упрочнение поверхностных слоев материала [9, 10]. Этот эффект присущ и для *AFM* плоских образцов из алюминия [11] и латуни [12], а также волноводов из сплавов $AlSi7Mg0,6$ [13] и $AlSi10Mg$ [14,15]. Так экспериментальное исследование обработки абразивным потоком сплава Al/SiC -MMC показало, что структура обработанной поверхности представлена комплексом рисок [16; 17], а производительность обработки зависит от величины абразива и его количества в рабочей среде, а также давления сдвига [18].

При обработке заготовок из алюминиевых сплавов для удаления дефектного слоя рекомендовано использовать абразив с углами при вершине микровыступов менее 90° , что характерно, например, электрокорунда, а для уменьшения шероховатости поверхности – с углами $90...120^\circ$ (например, карбид кремния) при силе прижатия единичного абразивного зерна в диапазоне $0,02...0,04$ Н, что позволит реализовать пластическое деформирование абразивной обработкой без удаления слоя материала [19]. Технология *AFM* успешно применена для обработки винта из алюминиевого сплава (рис. 1). Удалось обеспечить шероховатость лопастей $Ra = 0,3...0,4$ мкм [20].

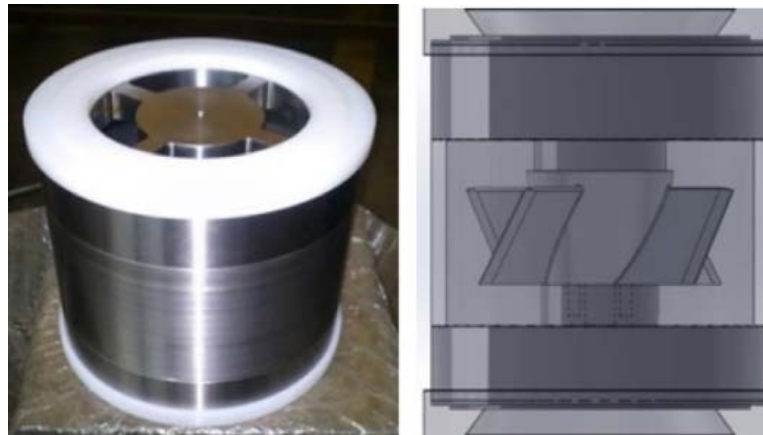


Рис. 1. Приспособление для обработки винта из алюминиевого сплава [20]

В последнее время обработка абразивным потоком все чаще применяется для отделки поверхностей деталей из алюминиевых сплавов, полученных методом селективного лазерного сплавления (*Selective Laser Melting (SLM)*). Исследование по улучшению шероховатости поверхности плоских образцов из алюминиевого сплава $AlSi10Mg$, полученных методом *SLM*, обработкой абразивным потоком показало, что шероховатость поверхности уменьшилась от $Ra = 13...14$ мкм до $Ra = 1,8...2,2$ мкм [14]. В развитии данной технологии удалось уменьшить шероховатость внутренних поверхностей изогнутых волноводов, изготовленных методом *SLM* из порошкового алюминиевого сплава АСП-45 ($AlSi10Mg$), с $Ra = 8,7...9,0$ мкм (рис. 2) до $Ra = 0,2...0,3$ мкм (рис. 3) [21].

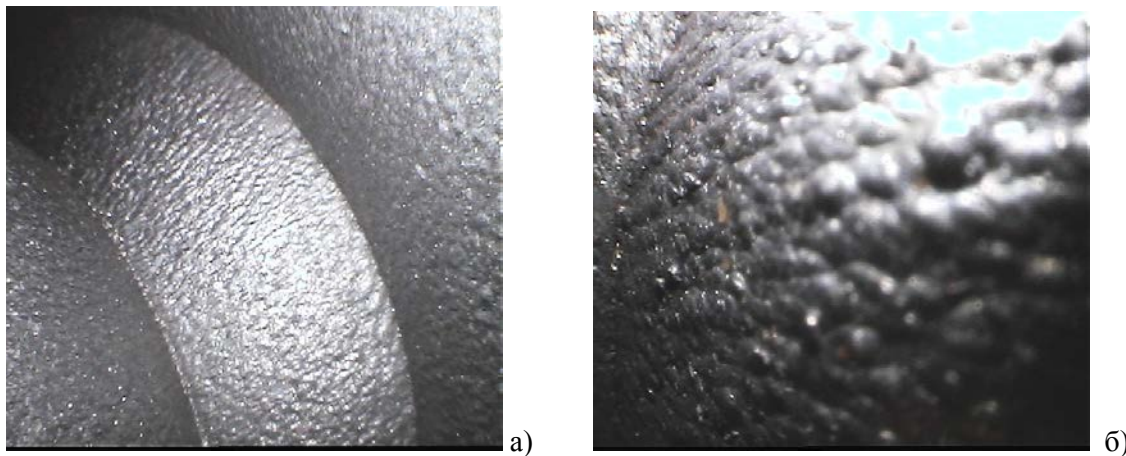


Рис. 2. Внутренняя поверхность алюминиевого волновода, полученного методом *SLM*, до обработки: а) на изогнутом участке; б) на входе и выходе канала [21]

Большую производительность при *AFM* алюминиевых сплавов показывают рабочие среды, управляемые на всем этапе их жизненного цикла [22-24] и содержащие в своем составе в качестве дополнительного компонента алмазные пасты [25,26].

Однако у ряда заготовок из алюминиевых сплавов припуск на финишную обработку может иметь ограниченную величину, что потребует точного регулирования факторами формирования качества поверхностного слоя.

Отделочно-упрочняющая обработка поверхностно-пластическим деформированием производится с целью уменьшения исходной шероховатости поверхности и увеличения ее несущей способности и частичного поверхностного упрочнения детали [27]. Для этого вида обработки характерно существенно меньшее изменение размеров обрабатываемой поверхности относительно тех технологий, для которых характерно микрорежание.

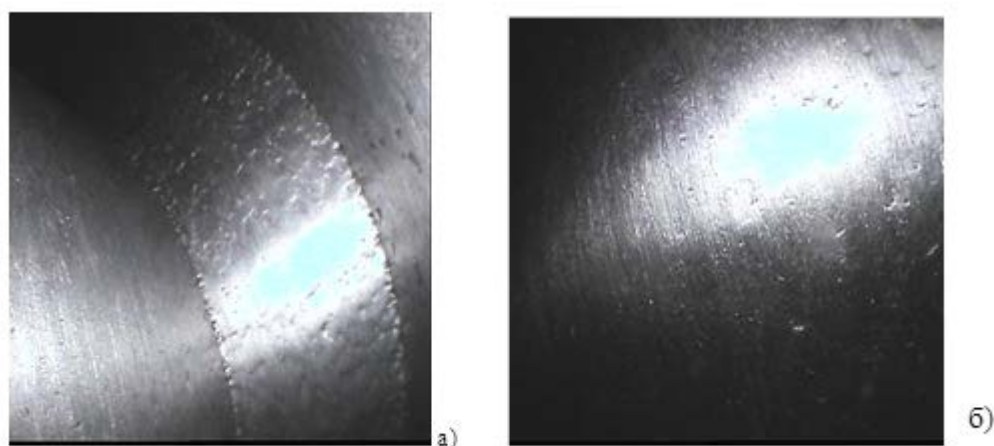


Рис. 3. Внутренняя поверхность алюминиевого волновода, полученного методом *SLM*, после 20 циклов *AFM*: а) на изогнутом участке; б) на входе и выходе канала [21]

Для уменьшения снимаемого слоя материала в ходе отделки за счет исключения такого вида контактных взаимодействий как микрорезание, предложено заменить абразивный наполнитель рабочей среды на стальные шарики [28, 29]. Это, позволило обеспечить отделочно-упрочняющую обработку внутренних поверхностей деталей с минимальной величиной удаляемого припуска.

Данная технология была применена для обработки образцов из термически не упрочняемого сплава АМг6. В процессе отделочно-упрочняющей обработки была получена равномерно обработанная поверхность сквозного отверстия. Микротвердость поверхности увеличилась на 30-35% – от 110-120 HV до 150-160 HV. На поверхности отсутствуют дополнительные дефекты, а ее шероховатость уменьшилась от $Ra = 3,6$ мкм до $Ra = 0,32-0,5$ мкм (рис. 4). Время обработки 150 секунд существенно меньше, чем при обработке по способу – прототипу (780 секунд) [30].

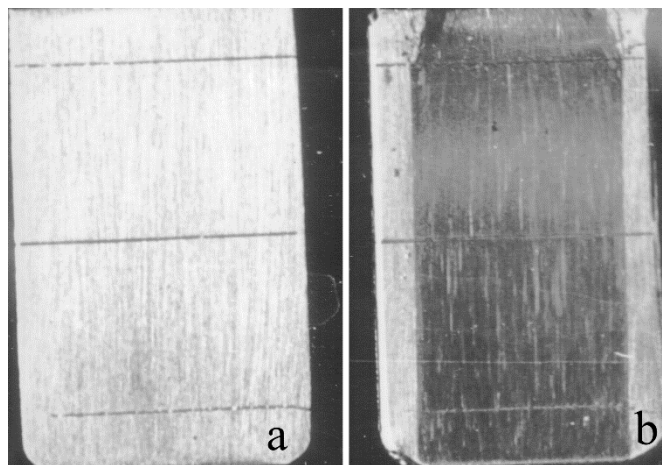


Рис. 4. Поверхность плоских образцов из сплава АМг6
а) до обработки; б – после 20 циклов обработки

Анализ современного уровня обработки абразивным потоком заготовок из алюминиевых сплавов показывает, что данная технология может быть успешно применена для повышения эффективности и надежности алюминиевых крыльчаток.

Разработка рекомендаций по отделочно-упрочняющей обработке крыльчаток из алюминиевых сплавов. Разработке рекомендаций построена на основе усовершенствованной методики разработки технологического процесса обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей [31].

Анализ исходной информации о геометрических характеристиках крыльчатки (открытая, полузакрытая, закрытая) наряду с построением 3D-модели, дает возможность принятия решения о целесообразности использования дополнительного элемента технологической оснастки в виде направляющего аппарата и его геометрических характеристиках. Это решение актуально при использовании схемы двунаправленной АФМ. Применение направляющего аппарата позволяет обеспечить одинаковые условия обработки по всей длине обрабатываемого канала, особенно на входной и выходной кромке [32,33]. При использовании схемы однонаправленной АФМ [34] или специального приспособления [35] необходимость применения направляющего аппарата отпадает.

Далее на основе анализа свойств материала обрабатываемой заготовки и требуемого изменения шероховатости и микротвердости поверхностей осуществляется выбор состава рабочей среды как абразивного или упрочняющего инструмента.

Так для обработки поверхностей с исходной шероховатостью Ra более 3,2 мкм рекомендуется в качестве твердого наполнителя использовать абразивные зерна. Если исходная шероховатость Ra менее 3,2 мкм, то возможно использование в качестве наполнителя стальных шариков. Причем процентное (по массе) содержание абразива (шариков) в рабочей среде будет иметь обратную зависимость от длины обрабатываемых каналов и прямую зависимость от минимальной площади поперечного сечения обрабатываемых каналов. Добавка до определённого значения в состав рабочей среды маэобразной алмазной пасты (как для абразива, так и для шариков) повышает производительность обработки.

Выбор значения давления сдвига (экструзии), создаваемого гидравлической системой установки, а также количества циклов обработки, возможен на основе модели контактных взаимодействий [36]. Для обработки алюминиевых сплавов абразивными рабочими средами величина давления сдвига рекомендуется в интервале от 6 до 8 МПа. Для обработки рабочими средами, наполненными стальными шариками, эта величина находится в диапазоне от 10 до 12 МПа. Как правило, 20 циклов АФМ достаточно для обеспечения требуемых значений шероховатости и микротвердости.

Выводы. Обработка абразивным потоком крыльчаток из алюминиевых сплавов позволит уменьшить шероховатость до $Ra = 0,32-0,5$ мкм и повысить микротвердость до 150-160 HV (до 200 HV для сплавов типа AlSi7Mg0,6 и AlSi10Mg) поверхностей их закрытых (полузакрытых) каналов. Это позволит существенно повысить их надежность и эффективность.

Литература:

1. Adiaconitei, A.; Vintila, I.S.; Mihalache, R.; Paraschiv, A.; Frigioescu, T.; Vladut, M.; Pambaguian, L. A Study on Using the Additive Manufacturing Process for the Development of a Closed Pump Impeller for Mechanically Pumped Fluid Loop Systems. *Materials* 2021, 14, 967. <https://doi.org/10.3390/ma14040967>
2. Глухих, В. Д. К вопросу особенностей насоса охлаждающей жидкости двигателя внутреннего сгорания / В. Д. Глухих, Г. М. Бураева, А. В. Косарева // Научный журнал молодых ученых. – 2024. – № 4(39). – С. 19-24. – EDN JYJFQD.
3. Технология производства жидкостных ракетных двигателей / В. А. Моисеев, В. А. Тарасов, В. А. Колмыков, А. С. Филимонов. – Москва : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2008. – 381 с. – ISBN 978-5-7038-3166-3. – EDN ZCLEDT.
4. Процесс формирования структуры и состава МДО-покрытий на алюминиевых сплавах / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, Е. В. Вахтеев [и др.] // . – 2013. – № 2(48). – С. 206-212. – EDNQISTCB.
5. Ширинкина, И. Г. Термическая стабильность ультрамелкозернистого алюминиевого сплава АМЦ после высокоскоростной деформации / И. Г. Ширинкина, И. Г. Бродова, В. В. Астафьев // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. – 2015. – № 5. – С. 72-79. – DOI 10.17804/2410-9908.2015.5.072-079. – EDN VUAZTJ.

6. Дударева, Н. Ю. Исследование влияния искрового упрочнения на прочностные свойства алюминиевого сплава / Н. Ю. Дударева, Н. Х. Мусин // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2012. – Т. 16, № 8(53). – С. 23-28. – EDN PXAKUL.
7. Silaeva, V. I. Structure and properties of castable aluminum alloy MVTU-6 after laser treatment / V. I. Silaeva, N. A. Smirnova, T. V. Solov'eva // Metal Science and Heat Treatment. – 2008. – Vol. 50, No. 1-2. – P. 77-79. – DOI 10.1007/s11041-008-9015-6. – EDN LLNDQP.
8. Rhoades L (1991) Abrasive flow machining: a case study. Journal of Materials Processing Technology. 1991 Vol. 28, Issues 1–2, P. 107–116 [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(91\)90210-6](https://doi.org/10.1016/0924-0136(91)90210-6).
9. Review of previous Russian studies in the abrasive flow machining / V. A. Levko, O. V. Litovka, D. I. Savin, N. S. Terjaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : III International Scientific Conference, Krasnoyarsk, 29–30 апреля 2021 года. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 12029. – DOI 10.1088/1757-899X/1155/1/012029.
10. Petare A. C., Jain N. K. A critical review of past research and advances in abrasive flow finishing process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 97. Issue 1-4. P. 741–782. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1928-7>.
11. Сысоева, Л. П. Абразивно-экструзионная обработка алюминиевых сплавов / Л. П. Сысоева // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 40-50. – EDN TLJIDJ.
12. Контактные взаимодействия при обработке абразивным потоком внутренней поверхности заготовок из латунных сплавов / П. А. Иванов, В. А. Левко, О. В. Литовка, Л. П. Сысоева // Вестник МГТУ "Станкин". – 2023. – № 1(64). – С. 114-124. – DOI 10.47617/2072-3172_2023_1_114. – EDN APYBDX.
13. Mathieu Francois, Sangil Han, Frederic Segond, Corinne Dupuy, Mickael Rivette, Simon Turpauot, Mendi Mimouna, Ferdinando Salvatoe, Joel Rech and Patrice Peyre. Electromagnetic performance of Ti6Al4V and AlSi7Mg0,6 waveguides with laser beam, melting (LBM) produced and abrasive flow machining (AFM) finished internal surfaces. Journal of Electromagnetic Waves and Applications - Vol. 35, n°18, p.2510-2526 – 2021. <https://doi.org/10.1080/09205071.2021.1954554>
14. Can Peng, Youzhi Fu, Haibo Wei, Shicong Li, Xuanping Wang, Hang Gao. Study on Improvement of Surface Roughness and Induced Residual Stress for Additively Manufactured Metal Parts by Abrasive Flow Machining. Procedia CIRP. Vol. 71. 2018. pp. 386-389, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.046>.
15. Abrasive Flow Machining of the Internal Surfaces of 3D-Printed Curved Rectangular Waveguides / P. A. Ivanov, V. A. Levko, M. M. Mikhnev, E. V. Patraev // Russian Engineering Research. – 2023. – Vol. 43, No. 9. – P. 1106-1111. – DOI 10.3103/s1068798x23090113. – EDN VARJPO.
16. Mali H. S., Manna A., 2011. Experimental Investigation during Finishing of Al/SiC-MMC's by Abrasive Flow Machining (AFM) Process. AMR. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.264-265.1130>.
17. Choopani, Y., Khajehzadeh, M. & Razfar, M.R. An experimental study on the abrasive flow machining of aluminum alloy (AA 2024). SN Appl. Sci. 5, 151 (2023). <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05370-3>.
18. Mittal Sushil, Kumar Vinod & Kumar Harmesh (2015) Experimental Investigation and Optimization of Process Parameters of Al/SiC MMCs Finished by Abrasive Flow Machining, Materials and Manufacturing Processes, 30:7, 902-911, DOI: 10.1080/10426914.2015.1004704.
19. Сысоева Л. П. Абразивно-экструзионная обработка алюминиевых сплавов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 40–50.
20. Manjunath M. A., Prakash Vinod, Balashanmugam N., Sankar M. R. Abrasive flow finishing for surface roughness improvement of aluminum propeller: A case study. Materials Today: Proceedings. V. 26, Part 2, 2020, P. 1113–1118, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.223>.
21. Обработка абразивным потоком внутренних поверхностей криволинейных волноводов прямоугольного сечения, полученных аддитивным способом / П. А. Иванов, В. А. Левко, М. М. Михнев, Е. В. Патраев // Вестник машиностроения. – 2023. – № 7. – С. 600–605. – DOI 10.36652/0042-4633-2023-102-7-600-605.
22. Левко, В. А. Повышение эффективности обработки абразивным потоком за счет управления факторами жизненного цикла рабочей среды / В. А. Левко, А. Е. Симакова, Д. И. Савин // Сибирский журнал науки и технологий. – 2017. – Т. 18, № 4. – С. 932-938. – EDN YNZWAE.

23. Левко, В. А. Влияние состава рабочей среды на технологические режимы абразивно-экструзионной обработки сложнопрофильных деталей / В. А. Левко, Е. Б. Пшенко // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2006. – № 4(11). – С. 64-68. – EDN INMCBX.
24. Nitin Dixit, Varun Sharma, Pradeep Kumar. Research trends in abrasive flow machining: A systematic review. *Journal of Manufacturing Processes*. Volume 64, 2021, Pages 1434-1461, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.009>.
25. Иванов, П. А. Перспективы обработки абразивным потоком внутренней поверхности изогнутых трубных заготовок прямоугольного сечения / П. А. Иванов, В. А. Левко // Металлообработка. – 2021. – № 4(124). – С. 11-19. – DOI 10.25960/mo.2021.4.11. – EDN МААТАТ.
26. Левко, В. А. Исследование процесса абразивно-экструзионной обработки малых отверстий / В. А. Левко, А. А. Левко // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2011. – № 4(37). – С. 169-173. – EDN OXPSXB.
27. Гуров, Р. В. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностно-пластическим деформированием / Р. В. Гуров, А. Н. Щербаков // Научные технологии в машиностроении. – 2021. – № 4(118). – С. 3-9. – DOI 10.30987/2223-4608-2021-4-3-9. – EDN VGMKTE.
28. А. с. 1379063 А1 СССР. МПК В24В 39/02. Способ чистовой обработки сквозных отверстий деталей.
29. Sahin B., Gov I., Kalak M. et al. Surface quality enhancement of cold work tool steel by GOV (flow peening) process versus abrasive flow machining. *Sādhana* 49, 24 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12046-023-02350-6>
30. Отделочно-упрочняющая обработка потоком стальных шариков деталей из термически неупрочняемых сплавов / В. А. Левко, Л. П. Сысоева, А. С. Сысоев [и др.] // Решетневские чтения : Материалы XXVIII Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со Дня рождения генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева. В 2-х частях, Красноярск, 18–22 ноября 2024 года. – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, 2024. – С. 562-564. – EDN ELHUYQ.
31. Левко В. А., Теряев Н. С., Литовка О. В., Иванов П. А. Совершенствование методики разработки технологического процесса обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей. *Металлообработка*, 2024, № 6, 18–32. DOI 10.25960/mo.2024.6.18
32. Совершенствование технологии обработки абразивным потоком закрытых каналов сложнопрофильных деталей / В. А. Левко, Н. С. Теряев, О. В. Литовка, П. А. Иванов // Металлообработка. – 2023. – № 3(135). – С. 3-12. – DOI 10.25960/mo.2023.3.3. – EDN HYPSTW.
33. Tao, Z., Yaoyao, S., Xiaojun, L. et al. Optimization of abrasive flow polishing process parameters for static blade ring based on response surface methodology. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2016. V. 30, no. 3. P. 1085–1093. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0213-7>
34. Aneesh Goyal, Harvinder Singh, Rachin Goyal, Rajdeep Singh, Swarn Singh. Recent advancements in abrasive flow machining and abrasive materials: A review. *Materials Today: Proceedings*. Volume 56, Part 5, 2022, Pages 3065-3072, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.109>.
35. Иванов, П. А. Перспективы обработки абразивным потоком внутренней поверхности изогнутых трубных заготовок прямоугольного сечения / П. А. Иванов, В. А. Левко // Металлообработка. – 2021. – № 4(124). – С. 11-19. – DOI 10.25960/mo.2021.4.11. – EDN МААТАТ.
36. Levko, V. A. Calculation of surface roughness in abrasive-extrusion machining on the basis of contact-interaction model / V. A. Levko // *Russian Aeronautics*. – 2009. – Vol. 52, No. 1. – P. 94-98. – DOI 10.3103/S1068799809010164. – EDN LLVRWH.

Development of recommendations for finishing and hardening treatment of impellers made of aluminum alloys based on the analysis of the modern level of abrasive flow machining

Sysoeva L. P.^{1,a}, Levko V.A.^{1,b}, Ivanov P. A.^{1,c}

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology 31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

^asysoeva.tms@mail.ru

Keywords: aluminum alloy, finishing and hardening treatment, abrasive flow machining, impeller

Impellers made of aluminum alloys are increasingly used in the production of pump, compressor, transport and aerospace equipment. It is noted that the limiting factor to their widespread use is their low resistance to fatigue. To improve the quality of the surface layer and the fatigue resistance of aluminum alloy blanks, various methods of surface plastic deformation and finishing and hardening treatment are used. An analysis of the current level of abrasive flow machining of workpieces made of aluminum alloys showed that this technology can reduce roughness to $Ra = 0.32-0.5 \mu m$ and increase microhardness to 150-160 HV (up to 200 HV for alloys of the AlSi7Mg0.6 and AlSi10Mg type) of the surfaces of closed (semi-closed) channels. The results of studies on the abrasive flow machining of aluminum alloy workpieces are presented. Recommendations have been developed for finishing and strengthening machining of impellers made of aluminum alloys. These recommendations include an analysis of the initial information on the geometric characteristics of the impeller and the selection of the machining scheme, as well as the composition of the working medium as an abrasive or hardening tool.

УДК 629.783.07

Разработка системы автоматизированного контроля процесса развертывания крупногабаритных солнечных батарей на базе микроконтроллеров

Рожкова Е.А.^{1,a}, Кустов А.В.^{1,b}

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

^ae_rozhok@vk.com, ^balexkust@mail.ru

Ключевые слова: крупногабаритные солнечные батареи, развертывание, автоматизация, микроконтроллеры, датчики, система управления, космические аппараты.

В статье представлена разработка автоматизированной системы контроля процесса развертывания крупногабаритных солнечных батарей на базе микроконтроллеров. Рассматриваются проблемы, связанные с ручным развертыванием КГСБ, предлагается решение по интеграции микроконтроллеров для мониторинга положения, скорости раскрытия и натяжения секций батареи. Описывается аппаратная и программная архитектура системы, а также результаты экспериментального исследования, подтверждающие эффективность предложенного решения. Система обеспечивает повышение надежности, точности и безопасности процесса развертывания КГСБ, что является критически важным для космических аппаратов и других применений, где требуется автономное функционирование.

Введение. Крупногабаритные солнечные батареи (КГСБ) являются ключевым компонентом космических аппаратов, обеспечивая электропитание бортовых систем, и эффективность работы аппарата напрямую зависит от надежности и точности развертывания КГСБ. Процесс развертывания представляет собой сложную задачу, включающую механическое раскрытие секций батареи, их фиксацию в рабочем положении и обеспечение необходимого натяжения.

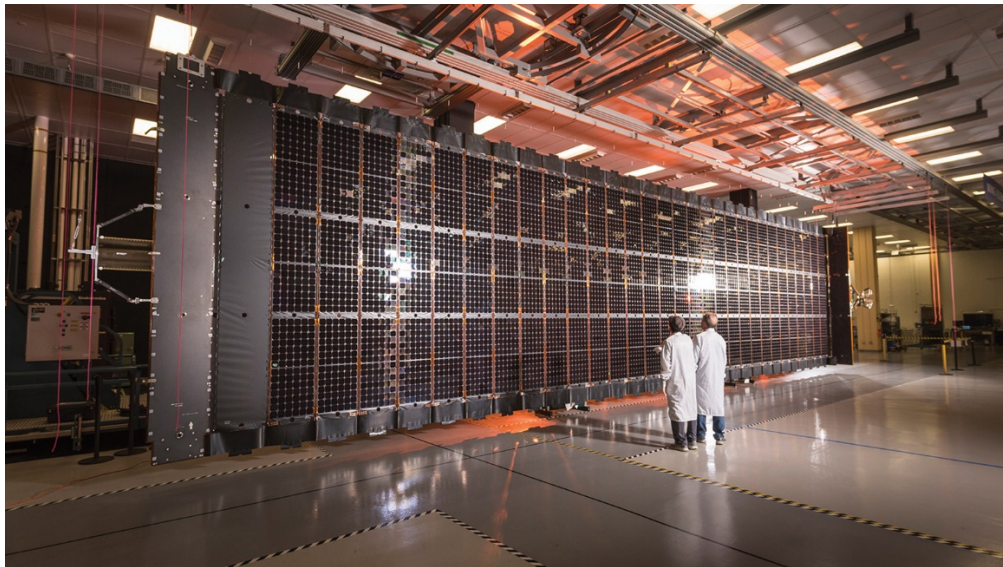


Рис. 1. Крупногабаритная солнечная батарея спутника LM2100.

Ручное управление этим процессом сопряжено с рядом проблем, таких как риск повреждения из-за неравномерного или слишком быстрого раскрытия, что приводит к механическим повреждениям секций батареи и снижению производительности или полному выходу из строя; неточное позиционирование секций, приводящее к затенению, уменьшению площади рабочей поверхности и снижению эффективности выработки электроэнергии; недостаточный контроль натяжения, вызывающий деформацию секций и ухудшение рабочих характеристик; а также ограничения по времени и ресурсам, обусловленные необходимостью постоянного присутствия оператора и значительными временными затратами. Для решения этих проблем предлагается разработать автоматизированную систему контроля процесса развёртывания КГСБ на базе микроконтроллеров, что позволит повысить точность, надёжность и безопасность процесса, оптимизировать его временные затраты и освободить оператора от рутинных задач.

Обзор существующих решений. Автоматизация процесса развёртывания крупногабаритных солнечных батарей является актуальной задачей, и в настоящее время существует несколько различных подходов, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Механические системы, основанные на приводах, редукторах и тросах, обеспечивают простоту конструкции, но предлагают ограниченный контроль, подвержены износу и не позволяют оперативно диагностировать неисправности. Программное обеспечение для моделирования, использующее метод конечных элементов, позволяет планировать и анализировать риски до начала развёртывания, но не управляет процессом в реальном времени, зависит от точности модели и требует значительных вычислительных ресурсов. Системы на базе ПЛИС (FPGA) и специализированных датчиков обеспечивают высокую производительность, параллельную обработку данных и точный контроль, но требуют сложной разработки, высокой стоимости и, в некоторых случаях, значительного энергопотребления.

Микроконтроллерные системы представляют собой оптимальный баланс стоимости и производительности, обладают простотой разработки, низким энергопотреблением, гибкостью и лёгкостью интеграции, хотя и имеют ограниченную вычислительную мощность и возможности параллельной обработки по сравнению с ПЛИС. Предлагаемая система на базе микроконтроллеров является компромиссным решением, сочетающим в себе необходимые характеристики для комплексного контроля развёртывания КГСБ, повышая надёжность, точность и безопасность. Выбор конкретного подхода зависит от требований к системе, бюджета и доступных ресурсов.

Микроконтроллер (МК) — это компьютер, размещившийся в одной микросхеме. Отсюда и его основные привлекательные качества: малые габариты; высокие производительность, надежность и способность быть адаптированным для выполнения самых различных задач. [1, 2]

МК осуществляет контроль за состоянием неких переменных и изменение системы в динамических условиях. По характеристикам МК соответствует центральному процессору компьютера ЦП (Central Processing Unit - CPU). Область его применения - хранение данных, выполнение арифметико-логических операций, управление системами. Для МК программа пишется на Ассемблере, который позволяет полно раскрыть все возможности микроконтроллера и получить максимальное быстродействие и компактный код. Основными факторами подбора микроконтроллера являются [3]:

1. Способность работы с прикладной системой.
2. Наличие в микроконтроллере необходимого количества портов, контактов.
3. Наличие необходимых устройств периферии: различных преобразователей, интерфейсов связи.
4. Обеспечение требуемой производительности: мощность вычислений, дающую возможность обработки запросов системы на определенном прикладном языке программирования.

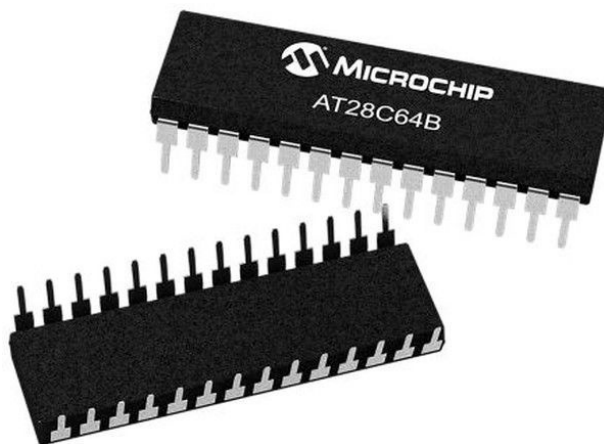


Рис. 2. Пример микроконтроллера.

Архитектура системы. МК является центральным элементом системы, осуществляющим обработку данных, поступающих с датчиков, управление исполнительными механизмами и обеспечивающим связь с внешними системами, например, с бортовым компьютером космического аппарата. Выбор МК производится с учетом его вычислительной мощности, характеристик энергопотребления и устойчивости к воздействию радиации, что особенно важно для космического применения.

Датчики предназначены для мониторинга ключевых параметров процесса развертывания КГСБ. В состав системы входят датчики положения, используемые для определения углового положения секций батареи в процессе раскрытия и реализованные на основе инкрементных энкодеров или акселерометров; датчики скорости, контролирующие скорость раскрытия секций и реализованные на основе измерения времени прохождения заданного расстояния секцией или путем обработки данных с энкодеров; датчики натяжения, используемые для контроля натяжения секций батареи после раскрытия и реализованные на основе тензодатчиков, измеряющих деформацию элементов конструкции; а также датчики температуры, обеспечивающие мониторинг температуры для компенсации тепловых деформаций и корректной работы других компонентов системы.

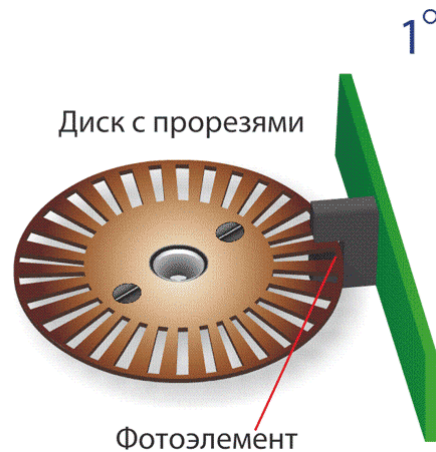


Рис. 3. Принцип работы инкрементного энкодера.

По конструктивному принципу инкрементные энкодеры разделяют на механические, оптические и энкодеры на основе эффекта Холла. В механических энкодерах формирование выходного сигнала производится за счет механической коммутацией контактов в местах прорезей на диске.

В оптических энкодерах в качестве чувствительного элемента выступает фотодиод (фототранзистор), освещаемый светодиодами. Между светодиодом и фотодиодом находится диск с прорезями. Когда диск поворачивается под углом, под которым свет может проходить через прорезь на диске, фотодиод открывается (на выходе формируется логический «0»), в противном случае фотодиод закрыт (на выходе формируется логическая «1»). Тем самым на выходе формируется последовательность импульсов. Нередко вместо диска с механическими прорезями устанавливают прозрачный диск с напыленными метками. Такая технология позволяет сделать достаточно большое число меток на оборот. [4]



Рис. 4. Внешний вид энкодера.

Энкодеры на основе эффекта Холла работают по принципу измерения изменения магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами. Обычно такие датчики формируют один-два импульса на оборот, но так как они обычно устанавливаются на ось двигателя до редуктора, то данного числа импульсов может быть достаточно для точного измерения положения вала исполнительного устройства (после редуктора). На практике оптические энкодеры надежнее механических, но они и дороже. Энкодеры на основе эффекта Холла могут конструктивно сходиться в состав двигателя постоянного тока. [4]

Исполнительные механизмы, представленные электродвигателями с редукторами, обеспечивают плавное и контролируемое раскрытие секций, управляя процессом развёртывания. Система электропитания, обеспечивающая электропитание всех компонентов системы, для космических применений реализуется с использованием солнечных панелей или аккумуляторных батарей. Интерфейс связи обеспечивает обмен данными между

системой управления и внешними системами (бортовым компьютером), используя стандартные интерфейсы, такие как CAN, SPI или UART.

Программное обеспечение системы состоит из следующих основных модулей: обработки данных с датчиков считывает и фильтрует данные, поступающие с датчиков, преобразуя их в понятный для системы формат; управления двигателями реализует управление исполнительными механизмами на основе данных с датчиков и заданных алгоритмов, обеспечивая управление скоростью и положением, защиту от перегрузок и контроль положения секций; мониторинга и диагностики обеспечивает мониторинг состояния системы, выявление и обработку ошибок, а также запись данных для последующего анализа; связи осуществляет обмен данными с внешними системами, реализуя протоколы связи и обеспечивая передачу команд и данных; пользовательского интерфейса, опциональный, предназначен для мониторинга процесса развёртывания и управления системой в случае наземных испытаний или в условиях, когда доступ к бортовому компьютеру затруднён.

Алгоритмы управления. Алгоритм управления скоростью раскрытия основан на PID-регуляторе, обеспечивающем плавное изменение скорости вращения электродвигателей, минимизацию перегрузок и предотвращение резких рывков, которые могут повредить КГСБ. Параметры регулятора настраиваются в зависимости от конструкции КГСБ и требований к скорости раскрытия.

Алгоритм управления положением основан на PID-регуляторе, обеспечивающем контролируемое достижение заданного положения секций батареи. Алгоритм учитывает погрешности датчиков и возможное воздействие внешних факторов (например, гравитации или динамического воздействия).

Алгоритм управления натяжением основан на мониторинге показаний тензодатчиков и регулировке натяжения секций путем плавной корректировки положения и скорости движения секций. Алгоритм обеспечивает поддержание оптимального натяжения для обеспечения максимальной эффективности КГСБ.

Экспериментальное исследование. Для подтверждения эффективности предложенной системы было проведено экспериментальное исследование. В качестве экспериментального стенда использовалась модель КГСБ с используемыми секциями и приводными механизмами. В качестве МК использовался микроконтроллер STM32F407VGT6. Были установлены датчики положения (инкрементные энкодеры) и датчики натяжения (тензодатчики).

Методика эксперимента. Эксперимент включал в себя следующие этапы:

1. Калибровка датчиков: проведена калибровка датчиков положения и натяжения.
2. Разработка программного обеспечения: разработано программное обеспечение для управления двигателями, обработки данных с датчиков и мониторинга процесса развёртывания.
3. Проведение серии экспериментов: проведено несколько экспериментов по развёртыванию модели КГСБ с различными параметрами:
4. Различные скорости раскрытия.
5. Целевые положения и значения натяжения секций.

Анализ результатов: проведен анализ полученных данных, включая оценку точности позиционирования, скорости раскрытия и стабильности натяжения секций.

Результаты эксперимента подтвердили эффективность предложенной системы. Были получены следующие результаты:

- ✓ Точность позиционирования: система обеспечила точность позиционирования секций в пределах ± 0.5 градуса.
- ✓ Контроль скорости: система обеспечила контроль скорости раскрытия секций в заданном диапазоне.

✓ Стабильность натяжения: система обеспечила поддержание стабильного натяжения секций в пределах $\pm 5\%$.

✓ Временные затраты: автоматизация процесса существенно сократила время, необходимое для развертывания модели КГСБ, по сравнению с ручным управлением.

✓ Функциональность обнаружения ошибок: в процессе экспериментов система успешно обнаружила ошибки, такие как заклинивание секций или выход из строя датчиков, и предприняла соответствующие меры для обеспечения безопасности.

Обсуждение результатов. Полученные результаты демонстрируют, что разработанная система автоматизированного контроля процесса развертывания КГСБ на базе микроконтроллеров является эффективным решением. Система обеспечивает высокую точность позиционирования, контроль скорости раскрытия и стабильность натяжения секций, что позволяет повысить надежность и эффективность работы КГСБ. Применение микроконтроллеров делает систему относительно простой в реализации, экономически эффективной и гибкой в настройке.

Заключение. В данной статье представлена разработка автоматизированной системы контроля процесса развертывания крупногабаритных солнечных батарей на базе микроконтроллеров, продемонстрировавшая эффективный подход к решению сложной технической задачи. Разработана детальная архитектура системы, включающая микроконтроллер, комплекс датчиков, исполнительные механизмы и программное обеспечение. Особое внимание уделено алгоритмам управления скоростью, положением и натяжением секций. Результаты экспериментальных исследований подтвердили эффективность предложенной системы. Для дальнейшего совершенствования предполагается улучшение алгоритмов управления, интеграция с бортовыми системами и проведение испытаний в условиях, приближенных к реальным, включая вакуум и низкие температуры. Также важна минимизация энергопотребления. Разработанная система обладает значительным потенциалом для применения в космических аппаратах и наземных системах, где требуется автоматизированное управление крупногабаритными конструкциями.

Литература:

1. Вуд А. Микропроцессоры в вопросах и ответах. / Пер. с англ. под ред. Д.А. Поспелова. М.: Энергоатомиздат, 1985. 184 с.
2. Нидилько М. В. Назначение и область применения, архитектура микроконтроллера // Достижения науки и образования. 2018. №6 (28).
3. Дмитриенко Г. В., Мухин Д. В. Автоматизация процесса диагностики параметров ПКМ на основе ПЛИС и микроконтроллеров // Известия Самарского научного центра РАН. 2021. №1.
4. Евстигнеев Д.В. Проектирование роботов и робототехнических систем в среде Dyn-Soft RobSim 5. Часть 2. Москва, 2012. 145 с.

Development of a system for automated control of the process of deploying large-sized solar batteries based on microcontrollers

Rozhkova E.A.^{1,a}, Kustov A.V.^{1,b}

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Russian Federation, 660037, Krasnoyarsk, Krasnoyarsky Rabochy Av., 31

^a e_rozhok@vk.com, ^b alexkust@mail.ru

Key words: large-scale solar panels, deployment, automation, microcontrollers, sensors, control system, spacecraft.

The article presents the development of an automated system for monitoring the deployment of large-sized solar batteries based on microcontrollers. The problems associated with manual deployment of the KGSB are considered, and a solution for integrating microcontrollers for monitoring the position, speed of deployment, and tension of the battery sections is proposed. The hardware and software architecture of the system is described, as well as the results of an experimental study confirming the effectiveness of the proposed solution. The system ensures increased reliability, accuracy, and safety of the KGSB deployment process, which is critically important for spacecraft and other applications where autonomous operation is required.

УДК 621.865

Перспективные технологические решения и современное оборудование в области автоматизации сборки силовых агрегатов с многозвенными трансмиссионными связями и редукторными передачами

Ерошков В.Ю.^{1,a}, Шеховцева Е.В.^{2,b}, Шеховцева Т.В.^{3,c}

^{1,2}Публичное акционерное общество «ОДК-Сатурн», пр. Ленина 163, Рыбинск, Россия

³Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева, ул. Пушкина, д. 53, г. Рыбинск, Россия

^aeroschkow@mail.ru, ^bevgeniya.shekhovtseva@uec-saturn.ru, ^ctanyha_fischburg@mail.ru

Ключевые слова: измерение, контроль, трансмиссия, центрирование, лазерный трекер

Выполнен обзор технологических решений, позволяющих усовершенствовать в серийном производстве процессы конструирования, сборки и монтажа силовых агрегатов на основе многокомпонентных конструкций с многозвенными трансмиссионными связями и редукторными передачами. Рассмотрены наиболее яркие технические решения (расчетные, конструкторские и технологические), а также перспективные направления применения современных цифровых средств измерения и контроля с учетом специфики производства данных изделий. Показано, что этап проектирования (расчета и конструирования) высокотехнологичных изделий является не менее значимым для повышения эффективности этапа сборки и монтажа изделия, чем, например, этап изготовления отдельных деталей и сборочных единиц.

В энергомашиностроении и судостроении эффективно используются силовые агрегаты на основе многокомпонентных конструкций, имеющих в основе две или более тепловые машины с газотурбинными (ГТД), дизельными двигателями, редукторами, соединенными в единую кинематическую связь трансмиссиями, в том числе составными и, часто – с дополнительными опорными подшипниками. Преимуществом таких изделий является значительный уровень мощности при хорошем КПД, компактность, по сравнению, например, с парогенераторными установками, модульность конструкции, ремонтпригодность.

Данные конструктивные решения приводят к проблемам сборки отдельных компонентов, монтажа и наладки изделий [1]. Это связано с особенностью роторного исполнения тепловых машин, наличием в конструкции высокоточных опор, многозвенных валопроводов, гибких муфт, промежуточных опор, сложных редукторных зубчатых передач и редукторов. Современные редукторные зубчатые передачи двигателей подвержены высоким силовым, температурным и вибрационным нагрузкам. В конструктивном и технологическом отношении они в ГТД являются одними из наиболее сложными.

Обеспечение качества их изготовления, надежности и ресурса, является актуальной задачей при создании и производстве конкурентоспособных изделий с редукторными передачами и трансмиссиями. Повышение надежности с обеспечением минимальных габаритно-массовых характеристик – один из основных технико-экономических показателей качества зубчатых передач редукторов данного назначения.

Уменьшение габаритов редукторов и соосность выходных и входного валов требует применять компактные конструктивные решения без снижения требований к прочностным характеристикам зубчатых колес. Все это привело к необходимости применения дифференциальных и планетарных передач в многокомпонентных конструкциях с многозвенными трансмиссионными связями. Но многообразие конструктивных решений и ограниченность по времени требует автоматизации процесса проектирования. Например, существуют методики автоматизированного проектирования и разработки зубчатых передач, включающих этап формирования исходных данных, этап определения габаритных параметров передачи, а также этап фильтрации по габаритным размерам. При этом на этапе фильтрации выбирают зубчатые передачи, у которых габаритные размеры находятся в диапазонах значений, указанных на этапе ввода исходных данных, затем проводят оценку по прочностным характеристикам и выбирают габаритные окончательные размеры зубчатой передачи на окончательном этапе.

Существуют и более совершенные методики, в частности на производстве используется методика проектирования редуктора [2], содержащая этап ввода исходных данных для разработки, после которого следует этап составления максимального количества вариантов конструкции, так же этап фильтрации, этап оценки и выбора и окончательный этап получения конструкторского решения. В зависимости от сочетания типа ступеней и типа зацепления формируется максимально применимая база различных редукторов. На этапе фильтрации по геометрическим параметрам выбирают ряд редукторов, для которых возможно построить структурную схему. Далее следует этап эскизной компоновки, на котором составляют эскиз кинематической схемы нескольких редукторов с учетом топологических связей и определением основных параметров зубчатых колес, определяется наличие и разработка планетарной передачи с обеспечением условий соседства, соосности и ее сборки. На этапе рабочей компоновки осуществляют этап оценки и выбора окончательной конструкции редуктора, в котором осуществляют оценку каждого редуктора из группы редукторов по конструктивному, технологическому, прочностному и эксплуатационному параметрам и выбирают, в зависимости от значения этих параметров, рекомендуемую конструкцию редуктора. Соответственно на окончательном этапе получения конструкторского решения формируют модель конструкции редуктора, затем конструкторский чертеж, на основе которого изготавливают готовый редуктор. Так же проводят испытания изготовленного редуктора для подтверждения заявленных исходных данных, иногда перед натурными испытаниями, на стенде, проводят «виртуальные» испытания цифрового двойника редуктора, но это отдельная тема для обсуждения [3].

Рассмотренный (очень коротко в настоящей публикации) метод проектирования редуктора позволяет изготовить редуктор оптимальной конструкции, конфигурируемый под определенные звенья валов и трансмиссий, изделие в целом, т.е. полностью удовлетворяющий требованиям заказчика. Соответственно другие методики проектирования часто не позволяют учесть все эксплуатационные факторы, влияющие на работы проектируемого редуктора от стыкуемых звеньев и внешние воздействия (температуры, вибрации и прочее). Способ позволяет изготовить конструкцию любого редуктора (от простого до планетарного и/или дифференциального редуктора) благодаря тому, что в способе учтены возможности сочетания передач с различными вариантами зацепления и механизмов. Применение данного способа способствует снижению трудоемкости изготовления, сборки и испытания на проектирование изготовление редуктора благодаря наличию наглядных этапов (этапы эскизной и рабочей компоновки), а также этапа

фильтрации (по геометрическим показателям) и этапа оценки и выбора по показателям (конструктивные, технологические, прочностные, эксплуатационные).

Следующим проблемным вопросом в вышерассмотренных конструкциях является высокая скорость вращения трансмиссионных и редукторных узлов газотурбинных агрегатов, нагрузки и вибрации, соответственно повышенный износ трущихся пар и усталость материала деталей, и, как следствие – снижение ресурса работы изделия. Сложность конструкции определяется так же наличием в составе многосменных трансмиссии с демпфирующими гибкими муфтами, виброизолирующих опор. Подобные агрегаты в сборе характеризуются значительной длиной – от 10 до 30 м и более, массой, измеряемой десятками и сотнями тонн (в зависимости от назначения). Характерным для такого производства является и наличие значительного количества покупных агрегатов и комплектующих. При монтаже газотурбинных и дизельных двигателей, а также редукторов проблемным вопросом является вес изделий, сложности центрирования.

В данном случае, актуальна задача разработки и реализации на практике комплекса технологических решений, повышающих надежность и ресурс, как отдельных деталей, узлов, так и изделия в целом. Конструктивные же особенности изделия определяют технологию его производства и формируют технические требования для ее выполнения.

Узким технологическим местом при сборке или монтаже газотурбинного агрегата (ГТА) является центрирование роторов, трансмиссий ГТД и стенового оборудования на испытательном стенде или на изделии [4]. Требования к центрированию довольно жесткие, в зависимости от габаритов изделия допустимая несоосность («излом осей») может составлять до 1 мм/м, и даже менее. Эффективность выполнения данного процесса зависит от исключения потерь времени на обеспечение, проверку и фиксацию положения всех компонентов газотурбинного агрегата и повторное центрирование. Существенными факторами являются значительные массо-габаритные характеристики компонентов, большое количество различной обвязки трубопроводов, ограничивающих свободу перемещения компонентов при их монтаже. При неправильном центрировании компонентов возникают дополнительные напряжения и деформация корпусов, перекося опор, изгибы трансмиссий и соединительных муфт. Следовательно, качество монтажа агрегатов во много зависит от обеспечения требований по соосности и центрированию роторов, в частности силовой турбины через муфту с трансмиссией для передачи крутящего момента к редуктору (рис. 1).

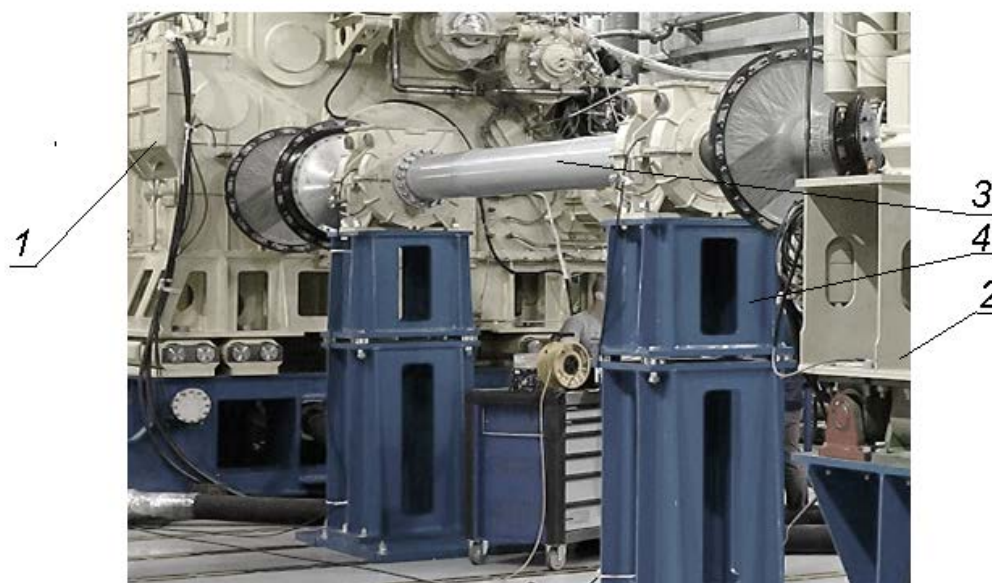


Рис. 1. Компоненты агрегата

1 – редуктор, 2 – двигатель, 3 – трансмиссия, 4 – опорные подшипники

Для оценки состояния редукторов широко применяется метод диагностики. Заключение производится по результатам виброизмерений. Для повышения эффективности данного метода необходима оценка редуктора от состояния его деталей и качества сборки. Упруго-жесткие параметры деталей редукторов (зубчатые колеса, опоры, валы) с учетом нагруженности содержат информацию о состоянии, которое определяется только отклонениями геометрических параметров – отклонение от соосности (линейное, угловое) – и классифицируется как погрешность вращения (кинематическая). Кинематическая погрешность включает в себя информацию о погрешностях сборки и состоянии подшипниковых опор, и возникает в результате дисбалансов валов, опор и зубчатых колес. Причина дисбаланса – это неоднородность материала, отклонение геометрии и монтажа и, как следствие, неравномерность при эксплуатации. Основная причина неравномерности вращения в редукторе является нарушение центровки осей зубчатых колес, валов относительно корпуса.

В настоящее время актуален вопрос диагностики состояния деталей редуктора и трансмиссии с учетом погрешности вращения с точки зрения повышения эффективности контроля и надежности агрегата в целом.

Несоответствиями по соосности и центрированию трансмиссий являются в основном линейные и угловые смещения осей всех сопрягаемых сборочных единиц от номинального положения общей оси вращения. В связи с этим, в конструкции изделия предусматривают регулировочные элементы для коррекции расположения компонентов с учетом смещения по трем осям и вращения вокруг них. Поэтому регулировка выставки сборочных единиц осуществляется в трехмерном пространстве при высокой точности взаимного положения деталей и жесткости их фиксации.

Выполнение заданных требований по соосности, например, при особо точном центрировании с первого предъявления не всегда удается. В этом случае выполняется многократная выверка и регулировка сборочных узлов силовой установки относительно стендового оборудования. Центрирование обеспечивается за счет подшлифовки пластин («клиньев»), которые устанавливаются между опорными поверхностями рамы и стенда. Подбор «клиньев» трудозатратное и много цикловое мероприятие и требует высокой квалификации персонала стенда.

Для выполнения данной задачи предлагается использовать прямой метод измерения основанный на базе лазерной системы центровки (рис. 2). Реализация данной технологии измерений позволяет достичь более высокой точности центровки, существенно сократить трудоемкость работ по монтажу агрегатов, а также обеспечить наглядность процедуры центровки, простоту предъявления операции службе технического контроля [5,6].

Беспроводные системы лазерного обеспечения соосности (центровки) используются на промышленных предприятиях России и за рубежом, в частности, для центровки валов газотурбинных двигателей, ГТА различного назначения, приводных электросистем в теплоэнергетике и машиностроении.

Датчик лазерной системы центровки оснащен двумя позиционно-чувствительными детекторами, встроенной микроэлектромеханической системой, которая обеспечивает возможность проведения одновременной корректировки положения по вертикали и горизонтали в реальном времени, а также датчиком углового положения вала. Во время вращения вала в режиме непрерывной линейной развертки достигается быстрое и точное считывание данных. Данные технические разработки обеспечивают высокую точность воспроизведения результатов даже при наличии механических ограничений, например, таких как свободный ход вала.

Монтаж лазерной системы центровки на валу достаточно прост. Компактное зажимное устройство датчика-лазера и датчика-приемника цепного типа обеспечивает максимально жесткую фиксацию компонентов измерительной системы.

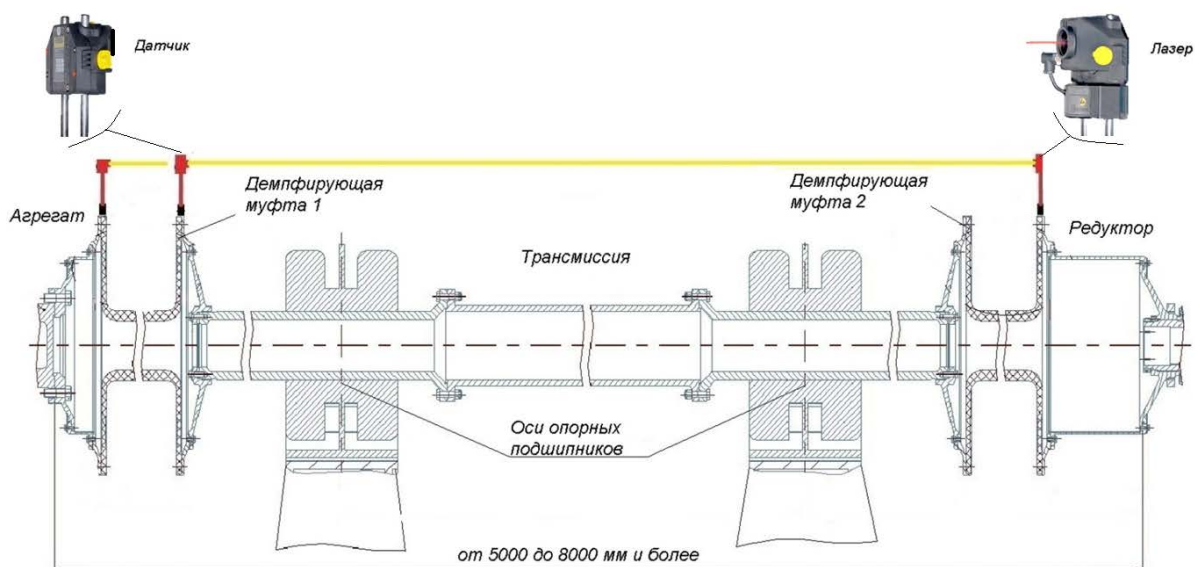


Рис. 2. Применение лазерной системы центровки при сборке трансмиссии на двух опорных подшипниках

После выполнения монтажа лазерной системы и ввода исходных данных выполняется коррекция лазерного луча по центру датчика-приемника путем регулировки зажимов крепежа и поворота дисковых регуляторов угла. Процедура выполняется в автоматическом режиме путем поворота трансмиссии включением валоповоротного устройства технологического редуктора. Результаты измерения относительного расположения осей трансмиссии отражаются на мониторе в виде значений их смещения и зазора в стыке муфты, как для горизонтальной, так и вертикальной плоскостей.

Для повышения производительности и снижения трудоемкости регулировочных работ на стенде вместо жестких металлических клиньев, подбираемых по толщине лучше применять универсальные регулируемые сферические опоры, предназначенные для простой и точной регулировки оборудования. Опоры регулируются по высоте за счет этого компенсируют угловой перекося до 5° между оборудованием и монтажным основанием, устраняя необходимость подгонки клиньев (металлических пластин) под опоры (рис. 3). Такие опоры устанавливаю под каждую опорную точку конструкции, рамы.

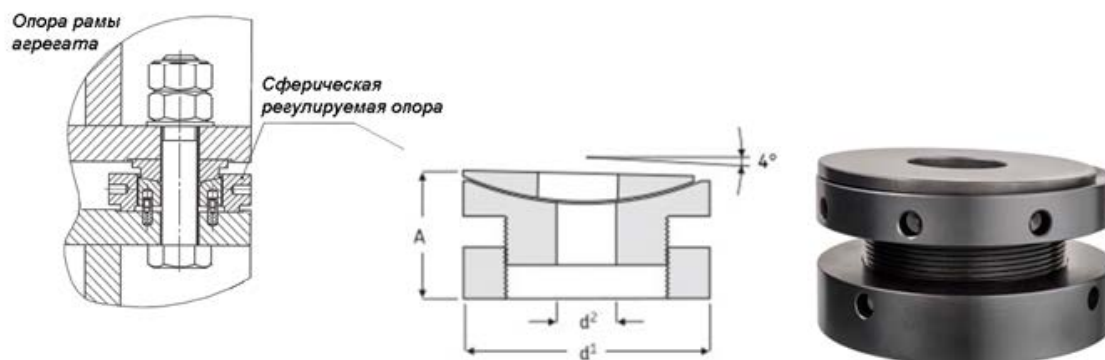


Рис. 3. Конструкция, принцип работы и внешний вид регулируемой сферической опоры

В сборочно-испытательных производствах для определения точных размеров трансмиссий, валов, и т.п. используется современное оборудование на основе технологий лазерного измерения размеров и координат. Для решения данных задачи предлагается использовать мобильные координатно-измерительные средства, например, на основе

лазерного трекера – прибора, использующего принцип слежения за отражателем, установленным (прислоненного) на контролируемый объект, посредством лазерного луча [7, 8].

Принцип работы лазерного трекера заключается в отражении лазерного луча от небольшого зеркального призматического отражателя, помещенного внутрь сферы. Лазерный трекер измеряет расстояние до отражателя, угол азимута и высоты, и с помощью программного обеспечения определяет координаты отражателя в пространстве в реальный момент времени относительно предварительно заданной системы координат. В корпусе измерительной головки лазерного трекера размещены прецизионный лазерный дальномер, преобразователи, датчики давления и влажности, сервоприводы, угломерные устройства, поворотное зеркало и две ортогональные оси вращения.

В процессе работы на дисплей компьютера лазерного трекера выводится трехмерная CAD модель, положение отражателя в реальный момент времени, расположение измеряемых точек и величины отклонений расположения от заданных величин. Для измерения деталей, не имеющих реальных геометрических баз (отверстия, пазы и т.п.), система имеет режим итеративной привязки, который позволяет совмещать детали и модели по точкам, выбранным на реальной модели с последующей оптимизацией методом пошаговых приближений.



Рис. 4. Использование лазерного трекера в производстве (контроль размеров трансмиссии)

Лазерный трекер имеет большой диапазон для измерений больших объектов и малых, т.е. систему можно использовать, например, и для центровки трансмиссий, и для определения габаритных размеров изделия сложной конфигурации, когда на пути луча измерительного устройства (лазерного дальномера) находятся различные объекты и измерения в таком случае приходится вести относительным путем.

Кроме того, ряд характеристик лазерного трекера позволяют использовать его в сложных производственных условиях, а именно:

- простые измерения при помощи беспроводной связи WLAN без необходимости подключения к ПК посредством кабеля - для лучшей мобильности и эффективности в производственных условиях;
- высокая скорость измерений, простота настройки;

- защита от воды и пыли, автоматическая компенсация перепадов температуры, т.е. защита от вредных производственных факторов.

Отметим, что высокая точность, универсальность, простота использования в производстве являются в большей степени типовыми для всех рассмотренных в данной публикации измерительных машин. Определенной сложностью может быть процесс освоения, аттестации, настройки, калибровки данного оборудования, и при этом достаточно прост процесс его постоянного использования по уже разработанным методикам и программам.

В заключении следует отметить, что рассмотренные выше расчётные, конструкторские (по редукторам) и технологические (по трансмиссиям) решения основаны как на использовании автоматизированных методов расчета и проектирования, так и на новых возможностях средств измерений с учетом автоматизации измерительных технологий, использовании современных измерительных приборов, оснастки и внедрения новых технологических цифровых средств измерения. При этом все данные решения подтверждены опытом эксплуатации данного оборудования в серийном производстве.

Литература:

1. Ерошков В.Ю., Шеховцева Е.В. Конструкторско-технологические решения в области совершенствования редукторных и трансмиссионных узлов газотурбинных агрегатов / Сборник докладов 8 Международного научно-технического семинара "Современные технологии сборки", Москва: МАМИ. 2023. С. 21 – 32.
2. Пат 2561649 Российская Федерация, МПК7 G06F 17/00. Способ изготовления редуктора / Шеховцева Е.В., Никифоров В.А.; заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение «Сатурн». – № 2014120167/11; заявл. 19.05.2014; опубл. 27.08.2015, бюл. № 24. – 17 с.
3. Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Конструкторско-технологическая инженерия рабочих поверхностей зубчатых колес газотурбинных двигателей // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2023. Т. 26. № 3. С. 16-25.
4. Ерошков В.Ю. Прогресс в области технологий монтажа и испытания морских газотурбинных агрегатов на испытательных стендах и направления их совершенствования // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. 2021. № 3 (58). С. 11 – 13.
5. Ерошков В.Ю. Повышение эффективности монтажа газотурбинных агрегатов на испытательном стенде на основе системы лазерной центровки валов и трансмиссий // Климовские чтения - 2019: перспективные направления развития авиа двигателестроения: сборник статей научно-технической конференции – СПб.: Скифия-принт. 2019. С. 317-327.
6. Ерошков В.Ю. Использование системы лазерной центровки трансмиссий OPTALIGN Smart при сборке и монтаже газотурбинных агрегатов // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. 2022. № 3 (62). С. 15 – 20.
7. Ерошков В.Ю. Методика калибровки гидравлического динамометра испытательного стенда корабельных газотурбинных агрегатов с помощью лазерного трекера // Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. тр. науч. симпозиума технологов-машиностроителей / Донской гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону: ДГТУ. 2019. С. 37-42.
8. Ерошков В.Ю. Инновационные технологии в сфере испытаний: использование мобильной координатно-измерительной машины на базе лазерного трекера для решения метрологических задач // Инновационные технологии в машиностроении (посвящается 65-летию со дня основания машиностроительного факультета Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ / ULSTU)). Международная научно-практическая заочная конференция (Россия, г. Ульяновск, 30 ноября 2022 года): сборник научных трудов [Электронный ресурс] / отв. ред. проф. В.П. Табаков, доц. Д.В. Кравченко. – Электронные данные. Ульяновск: УлГТУ. 2022. С.178 – 184.

Advanced process engineering solutions and up-to-date equipment in the field of automated assembly of power units with multi-link transmissions and reduction gears

Eroshkov V.Yu.^{1,a}, Shehovtseva E.V.^{2,b}, Shehovtseva T.V.^{3,c}

^{1, 2} Public Joint Stock Company "UEC-Saturn", 163 prospect Lenina, Rybinsk, 152903, Russian Federation

³ Rybinsk State Aviation Technical University, 53 Pushkin Street, Rybinsk 152934, Russian Federation

^aeroschkow@mail.ru, ^bevgeniya.shekhovtseva@uec-saturn.ru, ^ctanyha_fischburg@mail.ru

Keywords: measurement, control, transmission, centering, laser tracker

Engineering solutions to improve the processes of design, assembly and installation of power units based on multi-component design with multi-link transmissions and reducing gears in series production have been reviewed. The most vivid technical solutions (calculated, design and engineering) as well as promising areas of the use of modern digital measuring and control tools, taking into account the specifics of the production of these products, have been considered. It is demonstrated that the design (calculation and designing) stage of high -tech products is not less significant for improving the efficiency of the assembly and installation of the product than the manufacture of individual parts and assembly units.

УДК 621.9

Перспективы применения методики выявления критичных требований к сборке высокоточных изделий для оценки технологичности конструкции

Назарьев А.В.^{1,a}, Бочкарёв П.Ю.^{2,3,b}

¹Филиал АО «НПЦАП» - «ПО «Корпус», 410010, ул. Осипова, 1, г. Саратов, Россия

²Камышинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», 403874, ул. Ленина, 6а, г. Камышин, Волгоградская обл., Россия

³ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова», 410012, Театральная пл., 1, г. Саратов, Россия

^aalex121989@mail.ru, ^bbpy@mail.ru

Ключевые слова: технологичность конструкции изделия, высокоточное изделие, сборка, технологическая подготовка производства, технологический процесс.

В статье рассмотрены перспективы использования методико-математического аппарата комплекса формализованных проектных процедур системы учета требований к сборке высокоточных изделий при проектировании технологических процессов механической обработки для перехода к оценке производственной технологичности конструкции. Проведение подобной оценки обуславливается тем, что выполнение технологической подготовки производства как этапа технической подготовки невозможно без установления взаимосвязей с предшествующим этапом в логической последовательности создания продукции – конструкторской подготовки. А основой таких взаимосвязей является оценка технологичности изделий. В качестве исходных данных для проведения оценки технологичности конструкции изделий предлагается использовать информацию,

полученную из обобщенного графа сопряжений, применяемого при реализации методики выявления критичных требований к сборке высокоточных изделий.

Согласно источнику [1] технологичность конструкции изделия (ТКИ) – это совокупность свойств конструкции изделия, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат труда, при производственном изготовлении и техническом обслуживании для заданных показателей качества объема выпуска и условий выполнения работ.

Выполнение технологической подготовки производства как этапа технической подготовки невозможно без установления взаимосвязей с предшествующим этапом в логической последовательности создания продукции – конструкторской подготовки. Основой таких взаимосвязей является оценка технологичности изделий, которая обеспечивает наиболее полное использование конструкторско-технологических резервов для решения задач, связанных с повышением технико-экономических показателей изготовления и качества изделий с обеспечением заданных технических требований [2].

Для комплексного решения вопросов по обеспечению качества и точности высокоточных изделий, а также снижению издержек при их производстве был предложен комплексный подход - комплекс формализованных проектных процедур системы учета требований к сборке высокоточных изделий при проектировании технологических процессов механической обработки (СТСТПМ) [3]. Указанная СТСТПМ включает в себя три укрупненных блока проектных процедур и позволяет сгенерировать рациональные варианты технологических процессов (ТП) деталей и сборочных единиц (ДСЕ) изделий, учитывающих требования последующей сборки. Для реализации первого из них - блока анализа требований к сборке высокоточных изделий, применяется методика выявления критичных требований к сборке высокоточных изделий, основанная на построении обобщенного графа поверхностей [4]. В данной работе будут рассмотрены перспективы применения указанной методики для перехода к оценке ТКИ.

Оценка ТКИ представляет совокупность взаимосвязанных мероприятий по выявлению ее отдельных или целостных свойств, их сопоставлению со свойствами изделия, конструкция которого принята в качестве базы для сравнения, и представление результатов сопоставления в форме, приемлемой для принятия управленческих решений по совершенствованию конструкции разрабатываемого изделия.

В зависимости от используемых средств различают инженерно-расчетные и инженерно-визуальные методы, которые относятся, соответственно, к количественным и качественным методам оценки ТКИ [5].

Основные количественные показатели ТКИ представлены на рисунке 1.

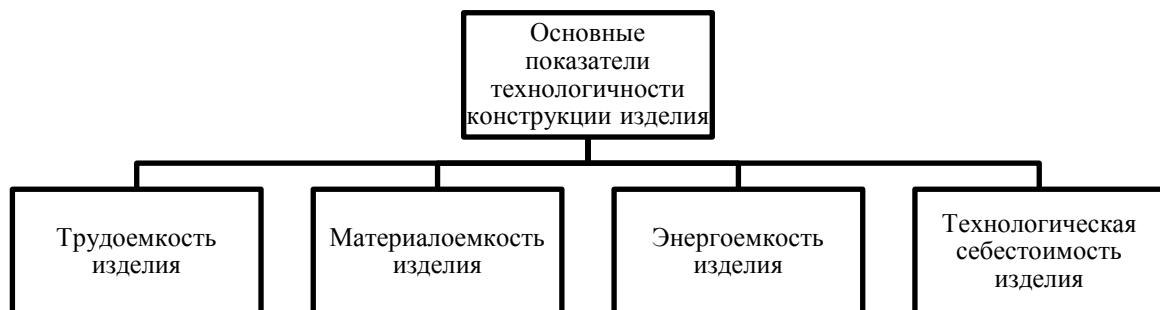


Рис. 1. Основные количественные показатели ТКИ

1. Абсолютный технико-экономический показатель трудоемкости сборки изделия ($T_{сб}$) выражается суммой нормо-часов, затраченных на его сборку:

$$T_{сб} = \sum T_{ci} \quad (1)$$

где T_{ci} – трудоемкость сборки и испытания i -й составной части изделия в нормо-часах.

2. Уровень технологичности конструкции по трудоемкости сборки $K_{y.m}$ определяется как отношение достигнутой трудоемкости сборки изделия $T_{сб}$ к базовому показателю трудоемкости сборки $T_{б.сб}$:

$$K_{y.т} = \frac{T_{сб}}{T_{б.сб}} \quad (2)$$

Выбор рациональных вариантов ТП в СТСТПМ оказывает непосредственное влияние на такие показатели технологичности, как трудоемкость изделия и технологическая себестоимость изделия. Однако косвенно оказывается влияние и на другие два показателя технологичности, т.к. выбор рациональных ТП изготовления определяет требования к исходной заготовке и последующей механической обработке, что обеспечивает снижение расходов на материалы и энергетические ресурсы. Также снижение расходов на энергетические ресурсы обеспечивает уменьшение количества итераций сборки.

Технологическая себестоимость изделия - часть себестоимости изделия, определяемая суммой затрат на осуществление ТП изготовления изделия. Данный показатель характеризует в стоимостном выражении ресурсоемкость изделия с учетом его конструктивных особенностей в сферах производства, эксплуатации и ремонта.

Для выбора рациональных вариантов ТП в СТСТПМ были предложены следующие критерии:

- 1) получение максимально возможного числа сборочных комплектов (СК)

$$W_{СК} = \max\{d_i\}, \quad (3)$$

где d_i – число сборочных комплектов для j_3 -го варианта ТП;

- 2) количество операций ТП изготовления деталей ($W_{оп}$);

3) общее количество технологических переходов для каждого из ТП изготовления деталей ($W_{пер}$);

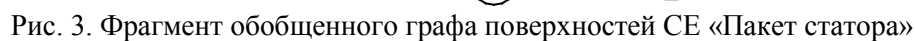
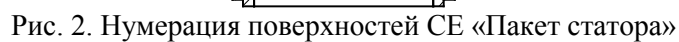
- 4) однородность технологического оборудования ($W_{отд}$).

Первый из предложенных критериев выбора рациональных ТП позволяет выбрать из множества ТП изготовления деталей такое их сочетание, которое обеспечит максимальное количество сборочных комплектов при проведении сборочных операций. Соответственно уменьшается время проведения сборочных операций за счет снижения количества итераций сборки. Из всех полученных вариантов рациональных ТП необходимо выбирать те, которые обеспечивают минимальную трудоемкость сборки $T_{сб.min}$, что, в свою очередь, согласно (2) обеспечит максимальный показатель технологичности конструкции по трудоемкости сборки $K_{y.т.max}$:

$$K_{y.т.max} = \frac{T_{сб.min}}{T_{б.сб}} \quad (4)$$

Кроме того, одним из предложенных критериев выбора рациональных ТП является критерий однородности технологического оборудования ($W_{отд}$), который одновременно является одним из показателей технологичности детали. Чем однороднее технологическое оборудование, применяемое при изготовлении ДСЕ, тем меньше потерь времени при движении ДСЕ, что ведет к общему сокращению времени производственного цикла.

Также следует отметить, что технологичность формы ДСЕ оценивают с учетом особенностей выбранного технологического метода обработки, конкретных условий и вида производства (массового, серийного, единичного), технологических возможностей и особенностей оборудования, для чего необходимо получение информации о характере поверхностей ДСЕ, их взаимном расположении и сопряжениях, а также о размерных и точностных характеристиках. Указанная информация может быть получена из обобщенного графа поверхностей ДСЕ, применяемого при реализации методики выявления критичных требований к сборке высокоточных изделий. Пример нумерации поверхностей сборочной единицы «Пакет статора» и фрагмент обобщенного графа данной сборочной единицы приведен на рисунках 2 и 3 соответственно.



Вывод. Таким образом модернизация методико-математического аппарата СТСТПМ позволит перейти к оценке ТКИ. В качестве исходных данных, необходимых для проведения ТКИ, целесообразно использовать информацию, полученную из обобщенного графа поверхностей ДСЕ.

Литература:

1. ГОСТ 14.205–83 Технологичность конструкции изделий. Термины и определения - Офиц. Изд. - М. : Изд-во стандартов, 1983. - 4 с.
2. Бочкарев, П. Ю. Технологичность как фактор повышения эффективности конструкторско-технологической подготовки механообрабатывающих производств / П. Ю. Бочкарев, Л. Г. Бокова // Вестник Дагестанского научного центра РАН. – 2012. – № 45. – С. 29-31.
3. Назарьев, А. В. Комплексный подход для выполнения технологической подготовки многономенклатурных механообрабатывающих производств на основе учета особенностей сборки высокоточных изделий / А. В. Назарьев, П. Ю. Бочкарев, Л. Г. Бокова // Справочник. Инженерный журнал. – 2019. – № 3(264). – С. 35-42.
4. Назарьев, А. В. Технологическое обеспечение сборки на основе принципов выявления критичных требований к высокоточным изделиям / А. В. Назарьев, П. Ю. Бочкарев // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2024. – Т. 24, № 1. – С. 66-77.
5. Семенов А. Н. Технологичность конструкции изделия машиностроения / А. Н. Семенов. - Рыбинск: РГАТУ имени П.А. Соловьева, 2016. – 217 с

Prospects of the application of the methodology of identifying critical requirements of the assembly of high-precision products to assess the manufacturability of the design

Nazaryev A.V.^{1,a}, Bochkaryov P.Yu^{2,3,b}.

¹Branch of the SC “Academician Pilyugin Scientific-Production Center of Automatics and Instrument-Making” – “Industrial Association “Korpus”, 410010, 1, Osipov St, Saratov, Russian Federation

²Kamyshin Technological Institute (branch) of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volgograd State Technical University», 403874, 6a Lenin Street, Kamyshin, Volgograd region, Russian Federation

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov», 410012, Teatralnaya square,1, Saratov, Russian Federation

^aalex121989@mail.ru, ^bbpy@mail.ru

Keywords: manufacturability of the product design, high-precision product, assemblage, process design, manufacturing method

The article considers the prospects of using the methodological and mathematical apparatus of a complex of formalized design procedures of the system of accounting requirements for the assembly in the design of manufacturing methods of machining to assess the manufacturability of the design. Such an assessment is due to the fact that the implementation of process design as a stage of technical training is impossible without establishing relationships with the previous stage in the logical sequence of product creation – design training. And the basis of such relationships is the assessment of the manufacturability of products. As initial data for assessing the manufacturability of the product design, it is proposed to use information obtained from the generalized graph of interfaces used in the implementation of the methodology for identifying critical requirements for the assembly of high-precision products.

Анализ влияния аэродинамических и конструктивных характеристик ветроэнергетических установок на их эффективность

Евтюхина К.В.^{1,a}, Архипов П.В.^{1,b}, Риттер Р.А.^{1,c}, Шалетов Е.П.^{1,d},
Туров З.И.^{1,e}

¹Братский Государственный Университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^aitinachii@gmail.com, ^bpavded@yandex.ru, ^critter.rodion020202@mail.ru, ^dshaletov@yandex.ru,
^ezturov731@gmail.com

Ключевые слова: ветроэнергетические установки, аэродинамика, конструкция лопастей, эффективность, методы оптимизации.

В современных условиях повышения спроса на возобновляемые источники энергии ветроэнергетические установки занимают важное место. Наиболее ответственной частью ветроэнергетической установки, определяющей в значительной степени эффективность ее работы, являются лопасти ветроколеса, которые требуют детальных исследований и совершенствований. Поэтому для обеспечения конкурентоспособности и энергетической эффективности ветроэнергетических установок наибольший интерес вызывает оптимизация конструкции ее аэродинамических элементов. В статье проведен анализ наиболее часто используемых профилей лопастей. Уделено внимание материалам для их изготовления. Определены основные параметры, влияющие на коэффициент аэродинамической силы, предложены рекомендации по оптимизации конструкции для увеличения энергетической эффективности. Практическая значимость исследования заключается в возможности использования данных рекомендаций для оптимизации конструкции ветроэнергетических установок, что позволяет повысить их КПД и снизить затраты на эксплуатацию.

В современных условиях повышения спроса на возобновляемые источники энергии ветроэнергетические установки занимают важное место [1 – 6]. Наиболее ответственной частью ветроэнергетической установки, определяющей в значительной степени эффективность ее работы, являются лопасти ветроколеса, имеющие в современных мощных ветроэнергетических установках длину 30...50 м. При таких размерах лопастей необходимо обеспечить требуемые параметры устойчивости от усталостных напряжений, поскольку лопасть подвергается воздействию переменного момента от максимума до минимума во время одного оборота [6]. При этом в технологии изготовления лопасти возникают определенные затруднения в обеспечении расчетного профиля, который изменяется по длине, а также обеспечении молниезащиты подшипников [6, 7]. Некоторые технологические задачи удается решать за счет применения современных материалов, а также применения автоматизированных систем управления самой установкой [3, 6, 7]. Большинство ветроэнергетических установок имеют типовые конструктивные решения, которые реализуются в использовании длинных валов, лопастей, обтекателя для снижения турбулентности воздушных потоков, привода, как правило, гидравлического, либо механического, подшипников лопастей и редуктора–мультипликатора, необходимого для увеличения скорости вращения до требуемой при выбранных конструктивных параметрах генераторов [6 – 11]. Подобные компоновки редуктора–мультипликатора широко применяются в вертолетостроении, однако данный механизм, испытывающий значительные переменные нагрузки, должен служить значительное время (многие годы) в отличие от вертолетных редукторов, которые работают в таких условиях непрерывно несколько часов [6]. Поэтому, при решении вопросов по обеспечению надежности конструкции

ветроэнергетических установок долгое время возникали определенные затруднения, которые в настоящее время частично решены [8 – 11].

Если конструктивные решения механической, а также электрической части ветроэнергетических установок постоянно совершенствуются и модернизируются, то аэродинамические элементы, как правило, используются стандартизованные, а их роль в эффективности установки немаловажна и их конструкция требует детальных исследований и совершенствований [13 – 14].

Поэтому для обеспечения конкурентоспособности и энергетической эффективности ветроэнергетических установок наибольший интерес вызывает оптимизация конструкции ее аэродинамических элементов.

Основная цель исследования заключается в определении ключевых параметров, влияющих на производительность ветроэнергетических установок и предложении решений для их улучшения.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- Провести анализ влияние профиля лопастей на аэродинамическую эффективность ветроэнергетических установок.
- Исследовать зависимость КПД установки от характеристик ветропотока.
- Разработать рекомендации по выбору материалов и конструктивных особенностей лопастей для повышения их надежности.

Материалы и методы исследования.

Для исследования использовались данные о ветроэнергетических установках мощностью 4...6 МВт. Аэродинамическое моделирование проводилось с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent.

Основные этапы исследования включали:

1. Определение геометрии лопастей

Для исследований выбраны три типа профиля аэродинамических элементов – NACA 4412, NACA 23015 и DU 93-W-210. Выбор обусловлен их широким применением в ветроэнергетике благодаря высокой аэродинамической эффективности и доступности экспериментальных данных по этим профилям из открытых источников, а также результатов прошлых исследований [13 – 14].

2. Анализ нагрузки

Для расчета распределения давления по поверхности лопастей принят диапазон ограничения по скорости ветра равный 12...25 м/с.

3. Испытания материалов

В качестве тестируемых материалов выбраны композиционные материалы (стеклопластик и углепластик), для которых определялись устойчивость к нагрузкам и усталостная прочность.

Экспериментальные испытания.

Данные для расчетов брались из стендовых испытаний, проводимых в лабораториях партнерских организаций, которые предоставляют доступ к оборудованию для оценки нагрузок, трения и эффективности профилей.

На рисунках 1 – 3 приведены расчетные схемы лопастей на аэродинамическую эффективность для рассматриваемых профилей.

Результаты исследования.

При анализе полученных данных о влиянии формы профиля лопастей на аэродинамическую эффективность было установлено, что для профиля NACA 4412 коэффициент аэродинамической силы C_R достигал 0,45 при скорости ветра 15 м/с. Профиль DU 93-W-210 показал более высокие результаты, у которого C_R достигал значения 0,48, что объясняется его адаптацией к низкоскоростным потокам. Профиль NACA 23015 обеспечил средний уровень эффективности, подходящий для универсальных условий эксплуатации.

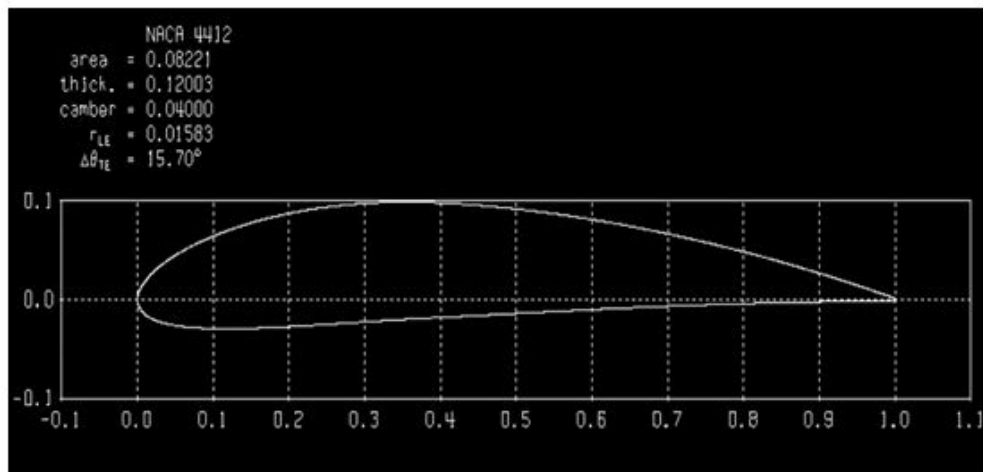


Рис. 1. Расчетная схема для профиля NACA 4412

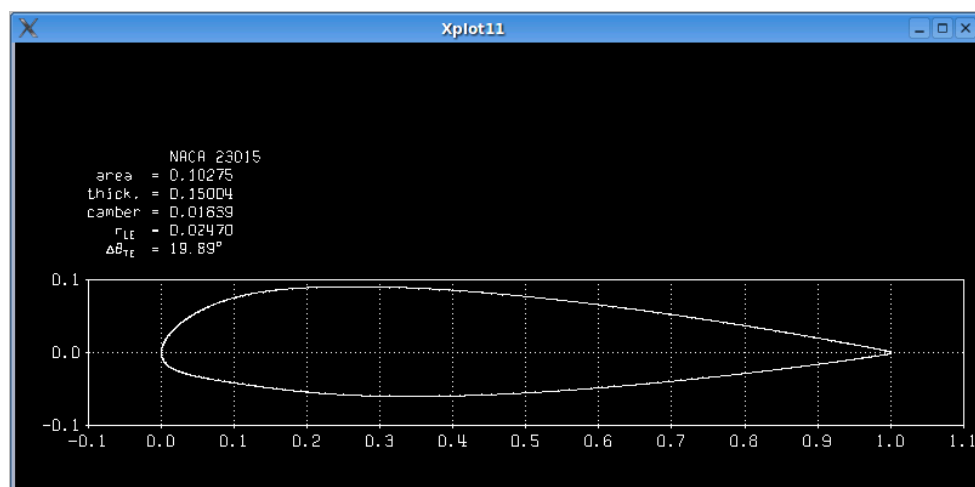


Рис. 2. Расчетная схема для профиля NACA 23015

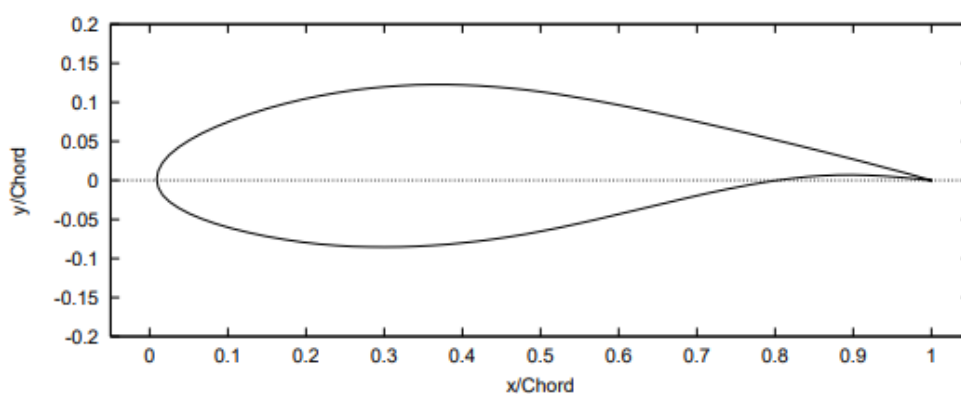


Рис. 3. Расчетная схема для профиля DU 93-W-210

Анализируя данные по расчету КПД лопастей в зависимости от характеристик ветропотока, определено, что при скорости ветра ниже 10 м/с, наблюдается значительное снижение КПД для всех рассматриваемых профилей. Однако для DU 93-W-210 эффективность оставалась стабильной даже при таких условиях благодаря оптимизированной геометрии в сравнении с двумя другими профилями. Это указывает на

необходимость выбора профиля с учётом конкретных ветровых условий и региона установки.

При анализе выбранных материалов следует отметить, что использование углепластика обеспечивает снижение общего веса лопастей на 15% при сохранении их прочностных характеристик. Однако, стеклопластик, обладая более низкой стоимостью, показал более высокую устойчивость к динамическим нагрузкам, что позволяет применять данный материал для ветроэнергетических установок, размещаемых в регионах с переменным ветровым режимом.

В ходе экономического анализа совокупных затрат рассматриваемых профилей отмечено, что переход на более дорогие материалы, увеличивает издержки производства на 20...25%. Однако, при этом срок окупаемости сокращается за счёт повышения энергетической эффективности ветроэнергетических установок. Так для установки мощностью 4 МВт дополнительная экономия составила до 15% за 10 лет эксплуатации.

Выводы.

Проведенные исследования и полученные результаты подтверждают, что профиль лопастей и материалы играют ключевую роль в обеспечении эффективности ветроэнергетических установок. Профиль лопастей DU 93-W-210 изготовленный из углепластика демонстрирует оптимальное сочетание аэродинамических и конструктивных характеристик для установки мощностью 4...6 МВт. При выборе материала для изготовления лопастей ветроэнергетических установок необходимо учитывать ветровые условия региона их установки и экономические аспекты производства и эксплуатации.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования данных рекомендаций для оптимизации конструкции ветроэнергетических установок, что позволяет повысить их КПД и снизить затраты на эксплуатацию.

Литература:

1. Губаев Д. Ф. Ветроэнергетические установки: перспективы развития в России / Д.Ф. Губаев, О.Г. Губаева, Т.Д. Губаев // Экономика строительства. – 2024. – № 4. – С. 157-159.
2. Глушенко М. А. Ветроэнергетические установки / Записки Горного института. – 2007. – Т. 170-1. – С. 156-159.
3. Медведев М.Ю. Автономные управляемые ветроэнергетические установки / М.Ю. Медведев, В.И. Борзов, В.Х. Пшихопов // Известия ТРТУ. – 2006. – № 3(58). – С. 202-207.
4. Герасимов Д.В. Ветроэнергетические установки / Современные тенденции развития науки и технологий. – 2016. – № 12-4. – С. 31-33.
5. Быстрицкий Г.Ф. Ветроэнергетические установки - дополнительный источник электроэнергии / Промышленная энергетика. – 2007. – № 10. – С. 40-46.
6. Безруких П. П. Ветроэнергетика: (справочное и метод. пособие) / П. П. Безруких. - Москва: ИД Энергия, 2010. - 314 с.
7. Грибков С.В. Вопросы оптимального проектирования ветроэнергетических установок малой мощности. Электрические генераторы ветроустановок малой мощности / С.В. Грибков, А. М. Русаков, А. М. Сугробов, Т. Америкго // Новое в российской электроэнергетике. – 2021. – № 4. – С. 17-36.
8. Федореев Г.А. Инновационные решения энергогенерации ВИЭ в Арктических регионах РФ / Г.А. Федореев, Ю.В. Криулин, В.Е. Беглюк, И.Д. Козубенко // Полярная механика. – 2016. – № 3. – С. 876-885.
9. Ковалев Л.К. Многополюсные синхронные генераторы с постоянными магнитами для ветроэнергетических установок / Л.К. Ковалев, К.Л. Ковалев, Е.Е. Тулинова, Н.С. Иванов // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2012. – № 6. – С. 64-74.
10. Бубенчикова Т.В. Выбор электрогенераторов для ВЭУ / Т.В. Бубенчикова, В.О. Молодых, А.И. Руденок [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 12-3(54). – С. 43-50.

11. Досаев М.З. Методика исследования влияния параметров генератора на эффективность малых ветроэнергетических установок / М.З. Досаев, Л.А. Климина // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2014. – № 4(54). – С. 94-102.
12. Жестков, Ю. Н. Оптимизация геометрии лопасти для малых ветроэнергетических установок / Ю. Н. Жестков, М. А. Сумбатьян, А. А. Бондарчук // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 4(108). – С. 91-94. – EDN PAVVTD.
13. Никольский О.К. Влияние изменения размеров лопастей на эффективность работы вертикально-осевой ветроэнергетической установки / О.К. Никольский, Б.П. Хозяинов, Ю.Ф. Глазков // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2023. – № 6(411). – С. 60-66.
14. Нуркимбаев С.М. Выбор оптимального варианта формы и относительной площади лопасти ветрового колеса ветроэнергетической установки малой мощности / С.М. Нуркимбаев, И.А. Шумейко, А.Ж. Касенов // Труды университета. – 2023. – № 2(91). – С. 25-33.

Analysis of the influence of aerodynamic and design characteristics of wind turbines on their efficiency

Evtyukhina K.V.^{1,a}, Arkhipov P.V.^{1,b}, Ritter R.A.^{1,c}, Shaletov E.P.^{1,d},
Turov Z.I.^{1,e}

¹Bratsk State University, st. Makarenko 40, Bratsk, Russia

^aitinachii@gmail.com, ^bpavded@yandex.ru, ^critter.rodion020202@mail.ru, ^dshaletov@yandex.ru,

^ezturov731@gmail.com

Key words: wind turbines, aerodynamics, blade design, efficiency, optimization methods.

In today's conditions of increasing demand for renewable energy sources, wind power plants occupy an important place. The most important part of a wind turbine, which largely determines its operating efficiency, is the wind wheel blades, which require detailed research and improvement. Therefore, to ensure the competitiveness and energy efficiency of wind power plants, the greatest interest is in optimizing the design of its aerodynamic elements. The article analyzes the most commonly used blade profiles. Attention is paid to the materials used to manufacture them. The main parameters influencing the aerodynamic force coefficient are determined, and recommendations for design optimization to increase energy efficiency are proposed. The practical significance of the study lies in the possibility of using these recommendations to optimize the design of wind turbines, which allows increasing their efficiency and reducing operating costs.

УДК 621.9

Модернизация коробки скоростей фрезерного станка

Архипов П.В.^{1,a}, Николаев В.А.^{1,b}, Тимофеев И.Т.^{1,c}, Синебрюхов С.А.^{1,d},
Туров З.И.^{1,e}

¹Братский Государственный Университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^apavded@yandex.ru, ^bniko_1998@inbox.ru, ^civan-timofeev-98@mail.ru, ^dsergeys33@mail.ru,

^fzturov731@gmail.com

Ключевые слова: фрезерование, коробка скоростей, надежность, производительность.

На малых и средних предприятиях существующее оборудование используется на грани своих технологических возможностей, что приводит к повышенному износу деталей и узлов, и в конечном итоге, к выходу из строя. Для предотвращения случайных отказов и

недопущения срывов изготовления объемов продукции существуют мероприятия по расширению технологических возможностей оборудования за счет полной или частичной его модернизации. В данной работе рассмотрена возможность повышения надёжности станка (коробки скоростей) за счет замены материала для изготовления зубчатых колес. Для этого были проанализированы физико-механические свойства исходного материала зубчатых колес, рассмотрены возможные конструктивные изменения в коробке скоростей, проведены прочностные расчёты, а также изготовлены и установлены новые зубчатые колеса для обновленной коробки скоростей.

Фрезерование является одним из производительных видов обработки, что позволяет использовать данный метод как для изготовления, так ремонта и восстановления деталей. На крупных предприятиях станочный парк претерпевает своевременное обновление и на смену морально и физически устаревшего вводится новое, производительное оборудование. Однако, для средних и малых предприятий такое обновление не всегда является экономически оправданным, а за частую убыточным, в виду высокой стоимости нового оборудования. Поэтому на таких предприятиях существующее оборудование используется на максимум своих технологических возможностей, что приводит к повышенному износу деталей и узлов, и в конечном итоге, к выходу из строя. Для предотвращения случайных отказов и недопущения срывов изготовления объемов продукции существуют мероприятия по расширению технологических возможностей оборудования за счет полной или частичной его модернизации [1-4].

Так, на малом предприятии ООО «Тимокс» в одном из цехов расположен механический участок по изготовлению больших объемов анодных штырей, которые необходимы при производстве алюминия. Технологический процесс содержит ряд операций, одна из которых фрезерная, где происходит фрезерование лысок торцевой фрезой Ø 200 мм, оснащенной напаянными твердосплавными режущими элементами (рис. 1).

Особенностью данной операции является то, что фрезерование производят при большой глубине резания (более 10 мм) и продольной подаче. Назначение таких режимов связано с особенностями обрабатываемого материала и требованиями по регламенту выпуска готовых изделий. При данных режимах возникает крутящий момент на шпинделе, значительно превышающий наибольший допустимый по паспорту станка. Момент передается на детали коробки скоростей, что приводит к выходу из строя зубчатых колес.

Максимальная мощность электродвигателя станка модели ВМ127 согласно паспортным данным составляет 11 кВт. По рекомендациям при работе на высоких числах оборотов шпинделя (более 63 мин⁻¹) пределы использования привода главного движения станка ограничиваются предельной мощностью установленного двигателя, а наибольшее усилие резания, допускаемое механизмом подачи, соответственно для продольной подачи составляет 19600 Н.



Рис. 1. Фрагмент обработки анодных штырей

Предварительный силовой расчет для фрезерной операции при данных составляющих режимов резания показал, что мощность, затрачиваемая на резание, составляет $N_e = 15,6$ кВт, что превышает максимально допустимую мощность электродвигателя станка на 42%. При этом, крутящий момент, возникающий на шпинделе, составляет $M_{кр} = 6109$ Нм, когда максимально допустимый крутящий момент равен $M_{кр.д} = 1343$ Нм.

Одним из путей решения данной проблемы является модернизация коробки скоростей станка, которая предусматривает повышение степени надежности и производительности, а также сокращение потерь рабочего времени за счет снижения отказов оборудования.

В данной работе рассмотрена возможность повышения надежности станка (коробки скоростей) за счет замены материала для изготовления зубчатых колес. Для этого были проанализированы физико-механические свойства исходного материала зубчатых колес, рассмотрены возможные конструктивные изменения в коробке скоростей, проведены прочностные расчёты, а также изготовлены и установлены новые зубчатые колеса для обновленной коробки скоростей.

В статье все примеры и расчёты приведены для первой пары зубчатых колес, для остальных деталей сопряжения расчеты выполнены аналогично.

Для изготовления зубчатых колес коробки скоростей станка до модернизации используется легированная сталь 40Х. Ее главными достоинствами являются прочность, износостойкость и устойчивость к коррозии.

Поскольку в процессе эксплуатации станка при таких режимах резания возникают предельные для стали 40Х нагрузки, в качестве заменителей выбраны материалы, наиболее подходящие для данной нагрузки, такие как 40ХН, 18ХГТ [5].

В процессе анализа [5, 6, 7, 8] были выявлены основные виды нагрузок на зубчатые колеса и в качестве сравнительной характеристики для рассматриваемых материалов выбрано допустимое контактное напряжение σ_H , МПа.

Для определения контактных напряжений можно воспользоваться формулой Герца для вычисления максимального нормального напряжения в зоне соприкосновения двух цилиндров по линейному контакту [8]:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{q \cdot E_{пр}}{2\pi \cdot (1 - \nu^2) \cdot \rho_{пр}}},$$

где q – нагрузка на единицу длины линии контакта (удельная нагрузка), $q = \frac{F_t \cdot K_H}{b_w}$; K_H – коэффициент нагрузки; b_w – рабочая ширина зубчатого колеса, мм; $E_{пр}$ – приведённый модуль упругости, Дж/м³; ν – коэффициент Пуассона, $\rho_{пр}$ – приведённый радиус кривизны цилиндров, мм.

Для упрощения, воспользуемся приложением расчета зубчатых передач программного обеспечения КОМПАС-3D.

На рис. 2 приведен фрагмент задания параметров расчета прочности при действии максимальных нагрузок на зубчатые передачи, в качестве исходных данных выбраны: расчетная нагрузка и частота вращения.

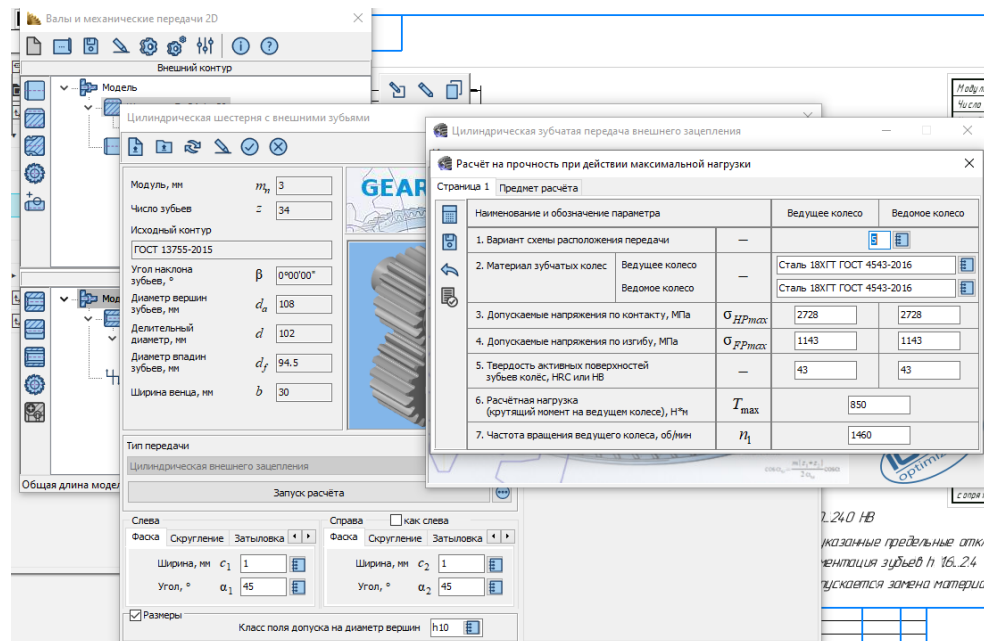


Рис. 2. Диалоговое окно выбора параметров расчета

На рис. 3 представлен фрагмент отчета по результатам расчета допустимого контактного напряжения σ_H для рассматриваемой пары зубчатых колес.

Таблица 1. Расчёт на прочность при действии максимальной нагрузки цилиндрической зубчатой передачи внешнего зацепления (по ГОСТ 21354-87)

Наименование и обозначение параметра	Ведущее ^{*1} колесо	Ведомое ^{*2} колесо
Исходные данные		
Число зубьев	z_1, z_2	34 46
Модуль, мм	m_n	3
Угол наклона зубьев на делительном цилиндре	β	0°00'00"
Угол профиля исходного контура	α	20°00'00"
Ширина зубчатого венца, мм	b	30 30
Коэффициент смещения исходного контура	x	0 0
Степень точности	—	7-C 7-C
Вариант схемы расположения передачи	—	5
Марка материала	σ_{H1}	Сталь 18ХГТ ГОСТ 4543-2016
	σ_{H2}	Сталь 18ХГТ ГОСТ 4543-2016
Твердость активных поверхностей зубьев, HRC	—	43 43
Расчётная нагрузка (крутящий момент на ведущем колесе), Н*м	T_{max}	850
Частота вращения ведущего колеса, об/мин	n_1	1460
Определяемые параметры		
Окружная скорость в зацеплении, м/с	v	7,797
Расчёт на контактную прочность		
Коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки по длине контактных линий	$K_{H\beta}$	1,09
Удельная окружная динамическая сила, Н/мм	w_{Hv}	48,32
Коэффициент, учитывающий динамическую нагрузку, возникающую в зацеплении до зоны резонанса	K_{Hv}	1,087
Окружная сила на делительном цилиндре, Н	F_{tH}	16666,667
Удельная расчетная окружная сила, Н/мм	w_{Ht}	658,469
Расчётное контактное напряжение, МПа	σ_{Hmax}	0
Допускаемое контактное напряжение, МПа	σ_{HPmax}	2728 2728
Коэффициент запаса по контактным напряжениям	n_H	-922337/2036854 776,32
Расчёт на прочность при изгибе		
Коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки по длине контактных линий	$K_{F\beta}$	1,033
Удельная окружная динамическая сила, Н/мм	w_{Fv}	55,223
Коэффициент, учитывающий динамическую нагрузку, возникающую в зацеплении до зоны резонанса	K_{Fv}	1,099
Окружная сила на делительном цилиндре, Н	F_{tF}	16666,667
Удельная расчетная окружная сила, Н/мм	w_{Ft}	630,739
Расчётное напряжение изгиба, МПа	σ_{Fmax}	811,18 789,887
Допускаемое напряжение изгиба, МПа	σ_{FPmax}	1143 1143
Коэффициент запаса по напряжениям изгиба	n_F	1,409 1,447

Рис. 3. Фрагмент отчета по результатам расчета на прочность

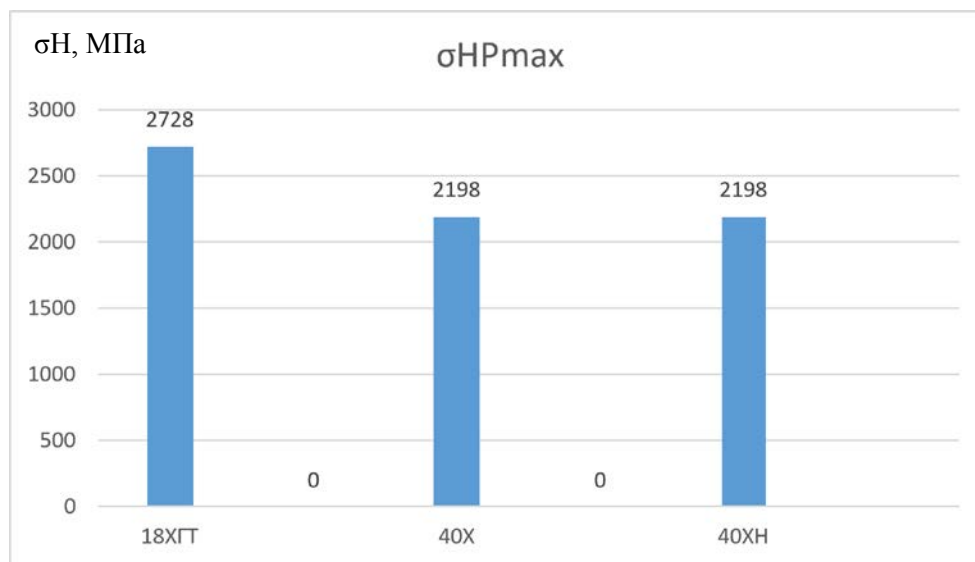


Рис. 4. Допускаемое контактное напряжение для выбранных марок сталей

На рис. 4 приведен сравнительный анализ допускаемого контактного напряжения выбранных марок сталей для изготовления зубчатых колес модернизированной коробки скоростей. Для стали марки 18ХГТ допускаемое контактное напряжение на 19,4% выше, чем у сталей 40Х и 40ХН, что позволяет данному материалу выдерживать более высокие нагрузки.

Выполним расчет контактного напряжения для рассматриваемой пары зубчатых колес, изготавливаемых из различных марок сталей. Результат расчета приведен на рисунке 5.

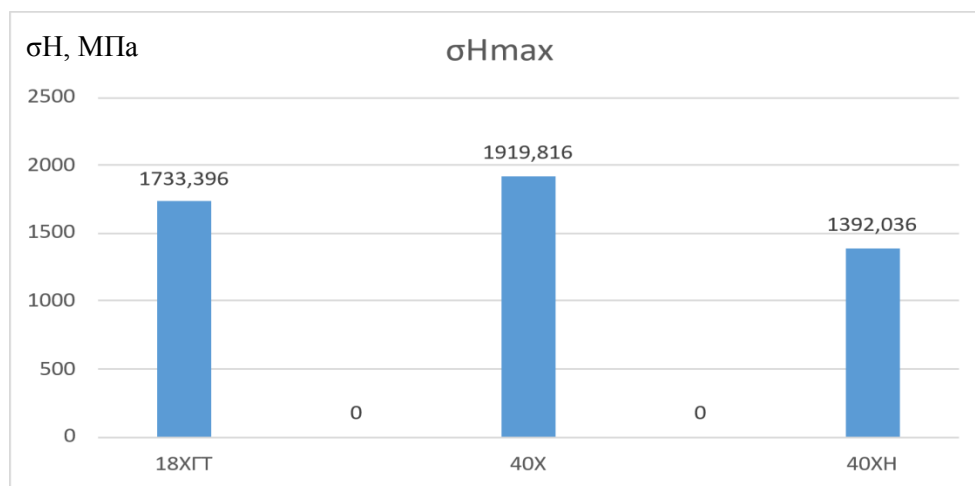


Рис.5. Расчетное контактное напряжение для выбранных марок сталей

Анализируя полученные данные, следует отметить, что запас прочности по контактному напряжению зубчатых колес в рассматриваемых условиях работы для стали 18ХГТ составляет 57,4%, для стали 40Х и 40 ХН – 12,7% и 36,7% соответственно.

По результатам расчета прочности для каждой пары зубчатых колес соответствующего передаточного отношения в модернизируемой коробке скоростей принято решение использовать сталь 18ХГТ, поскольку данный материал наилучшим образом соответствует требованиям по прочности и имеет гарантированный запас по надежности.

На рисунке 6 приведена развертка модернизированной коробки скоростей фрезерного станка, а также ее фото после сборки. В процессе модернизации разработаны и изготовлены зубчатые колеса из стали 18ХГТ, геометрические и конструктивные параметры которых

соответствуют стандартным валам и зубчатым колесам коробки скоростей данного фрезерного станка.

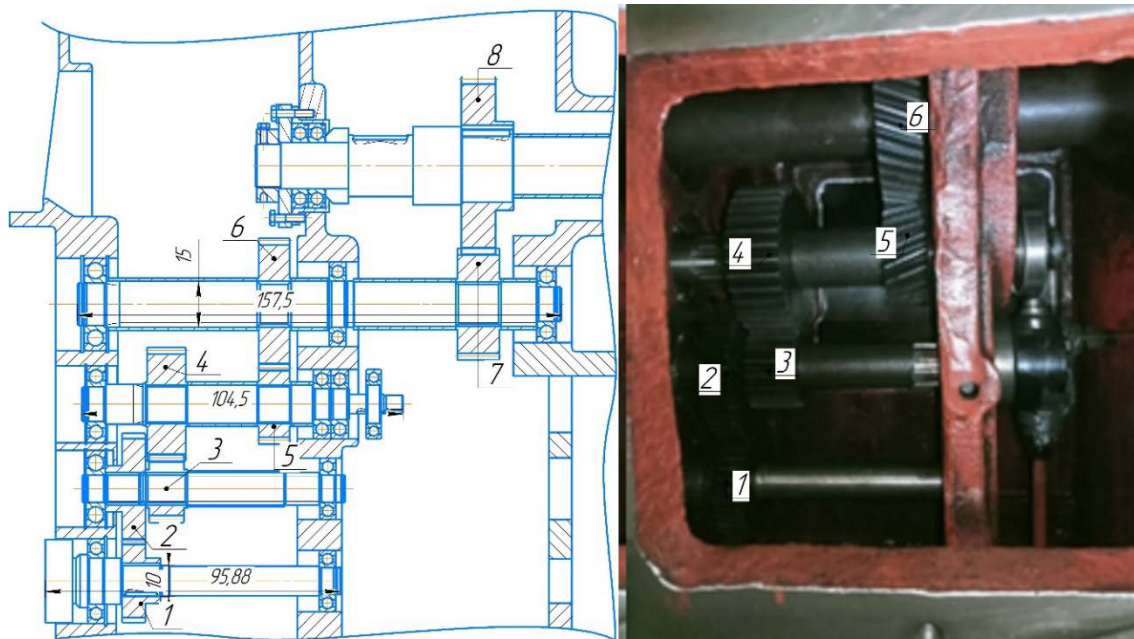


Рис.6. Развертка и общий вид модернизированной коробки скоростей фрезерного станка

Подводя итог, следует отметить, что подобранный материал 18ГХТ для изготовления зубчатых колес, взамен применяемого 40Х, позволяет выдерживать необходимые нагрузки при работе станка, имеет наиболее высокий запас прочности по сравнению с другими рассматриваемыми материалами, который составляет 57,4%. Материалы подбирались исходя из наличия их на производстве. Модернизация коробки скоростей значительно повысила надёжность и эффективность работы фрезерного станка ВМ127 при выполнении производственных задач, что в свою очередь, позволило сократить время простоев по случайным отказам и ремонтам. Модернизация не затронула конструктивных элементов станины и не понизила жесткости станка.

Литература:

1. Федоров Ю.Н., Артамонов В.Д., Кондрашов В.А. Модернизация фрезерных станков для эффективного зубонарезания цилиндрических колес // Технология машиностроения. 2012. № 5. С. 27-30.
2. Тимирязев В.А., Схиртладзе А.Г., Агеева В.Н., Дудко С.А. Расширение технологических возможностей и повышение эффективности многоцелевых станков в ремонтном производстве путем расширения состава режущего инструмента // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2016. № 11. С. 3-6.
3. Хостикоев М.З. Расширение технологических возможностей и повышение эффективности многоцелевых станков путем интеграции в их наладки тангенциальных резьбонакатных головок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № S4-6. С. 54-56.
4. Малышев Е.Н., Малышев А.Н. 77-48211/460114 повышение эффективности использования обрабатывающего оборудования путем расширенной реализации его технологических возможностей // Инженерный вестник. 2012. № 8. С. 3.
5. ГОСТ 4543-2016. Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия: нац. стандарт Российской Федерации: утвержден и введен в действие приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 13 января 2017г. № 10-ст: дата введения 2017-10-01.

6. Зарецкий В.В. Прикладная механика. Детали машин и основы конструирования // Учебное пособие / Санкт-Петербург, 2010.

7. Буланов Э.А. Детали машин. Расчет механических передач // Учебное пособие / Сер. 76 Высшее образование. (3-е изд., испр. и доп) Москва, 2020.

8. Иванов А.С. Конструируем машины шаг за шагом: В 2 ч. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – Ч.2. – 392 с.

Modernization of the gearbox of a milling machine

Arkhipov P.V.^{1,a}, Nikolaev V.A.^{1,b}, Timofeev I.T.^{1,c}, Sinebryukhov S.A.^{1,d},
Turov Z.I.^{1,e}

¹Bratsk State University, st. Makarenko 40, Bratsk, Russia

^apavded@yandex.ru, ^bniko_1998@inbox.ru, ^civan-timofeev-98@mail.ru, ^dsergeys33@mail.ru,

^ezturov731@gmail.com

Keywords: milling, gearbox, reliability, performance.

In small and medium-sized enterprises, existing equipment is used at the limits of its technological capabilities, which leads to increased wear of parts and components, and ultimately, to failure. In order to prevent accidental failures and to avoid disruptions in production volumes, there are measures to expand the technological capabilities of equipment through its complete or partial modernization. This paper examines the possibility of increasing the reliability of a machine tool (gearbox) by replacing the material used to manufacture gear wheels. To do this, the physical and mechanical properties of the original material of the gear wheels were analyzed, possible design changes in the gearbox were considered, strength calculations were carried out, and new gear wheels were manufactured and installed for the updated gearbox.

УДК 621.9

Анализ влияния шероховатости поверхности кулачковых валов на их износостойкость и долговечность

Архипов П.В.^{1,a}, Евтюхина К.В.^{1,b}, Синебрюхов С.А.^{1,c}, Шалетов Е.П.^{1,d},
Риттер Р.А.^{1,e}

¹Братский Государственный Университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^apavded@yandex.ru, ^bitinachii@gmail.com, ^csergeys33@mail.ru, ^dshaletov@yandex.ru,

^eritter.rodion020202@mail.ru

Ключевые слова: кулачковые валы, шероховатость поверхности, износостойкость, долговечность, методы обработки.

Качество поверхностного слоя деталей, как совокупный показатель, является одним из определяющих факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики готового изделия во многих отраслях промышленности. Кулачковые валы являются ключевыми элементами газораспределительного механизма двигателя внутреннего сгорания. Они испытывают значительные нагрузки при трении, что делает качество их поверхности критическим фактором для надёжной работы двигателя. Шероховатость исполнительных поверхностей кулачковых валов определяет уровень трения, тепловыделения и износа, что сказывается на общем ресурсе двигателя. В статье проанализировано влияние параметров шероховатости поверхности кулачковых валов на их износостойкость, тепловыделение и

общую долговечность. Приведены результаты экспериментальных исследований зависимости некоторых эксплуатационных характеристик кулачковых валов от параметров механической обработки. Определен диапазон рациональных значений шероховатости, предложены рекомендации по совершенствованию производственного процесса обработки для повышения надёжности изделий.

Качество поверхностного слоя деталей, как совокупный показатель, является одним из определяющих факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики готового изделия во многих отраслях промышленности. В частности, для машиностроительной отрасли, качество детали наиболее часто определяется параметром шероховатости в зависимости от методов обработки и назначения детали [1, 2]. И именно шероховатость, в большинстве случаев, будет определять степень износостойкости и долговечности изделия, особенно для деталей пар трения [3, 4].

Кулачковые валы являются ключевыми элементами газораспределительного механизма двигателя внутреннего сгорания [5, 6]. Они испытывают значительные нагрузки при трении, что делает качество их поверхности критическим фактором для надёжной работы двигателя [2, 5]. Шероховатость исполнительных поверхностей кулачковых валов определяет уровень трения, тепловыделения и износа, что в конечном итоге влияет на общий ресурс двигателя [6 – 8].

Целью исследования является определение рациональных параметров шероховатости исполнительных поверхностей кулачковых валов для разработки рекомендаций по их достижению с учетом производственных и экономических факторов.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие основные задачи:

- проанализировать влияние различных методов обработки на шероховатость поверхности;
- провести экспериментальные исследования эксплуатационных характеристик кулачковых валов с разными уровнями шероховатости;
- выявить рациональные параметры шероховатости, обеспечивающие снижение износа и повышение долговечности.

Материалы и методы исследования

При исследовании проведён комплекс экспериментальных работ с образцами кулачковых валов, изготовленных из легированной конструкционной стали 18ХГТ, которые обработаны различными методами – точение, шлифование, полировка.

Для измерения шероховатости исполнительных поверхностей по параметрам R_a и R_z , применялся лазерный профилометр класса точности 2 и диапазоном измерений по R_a – 0,005...16,00 мкм., по R_z – 0,020...160,0 мкм.

Экспериментальные исследования эксплуатационных характеристик валов на износ проводились на специальном стенде, имитирующем условия реальной эксплуатации (скорость вращения – 3000 мин⁻¹, наибольшая нагрузка – 50 Н).

Контроль температуры в зоне контакта кулачка и толкателя осуществлялся с помощью тепловизора с диапазоном измерения: -20°C ~ 400°C. Расчетное тепловыделение определялось по формуле 3.

Для оценки экономической составляющей проводился расчет приведенных затрат на каждую стадию обработки.

Параметры шероховатости поверхности сравнивались в трёх группах:

Группа 1: $R_a = 0,2...0,4$ мкм (шлифование и полировка).

Группа 2: $R_a = 0,5...0,8$ мкм (шлифование).

Группа 3: $R_a = 1,0...1,5$ мкм (точение).

Результаты исследования

Для оценки влияния различных методов обработки на эксплуатационные характеристики кулачковых валов проведён анализ износостойкости, тепловыделения и экономической эффективности.

Для определения износостойкости (износа) исполнительных поверхностей кулачковых валов можно воспользоваться формулой:

$$W = H \cdot F \cdot v \cdot t, \quad (1)$$

где W – величина объемного износа, мм³; F – нагрузка на кулачок, Н; v – скорость скольжения пары трения, м/с; t – время работы, с; H – твердость материала, МПа.

Для валов с параметром шероховатости $Ra = 0,2 \dots 0,4$ мкм (группа 1) износ составил 0,015 мм³ за 100 часов работы. В группе 2 ($Ra = 0,5 \dots 0,8$ мкм) износ увеличился до 0,020 мм³, а в группе 3 ($Ra = 1,0 \dots 1,5$ мкм) достиг 0,030 мм³. Разница в износе между группами определялась по формуле:

$$\Delta W = \frac{W_{\text{группа3}} - W_{\text{группа1}}}{W_{\text{группа1}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

Таким образом, износ в группе 3 оказался на 100% больше, чем в группе 1, а в группе 2 – на 33% выше, чем в группе 1.

Для определения тепловыделения в зоне контакта исполнительных поверхностей кулачковых валов и толкателя воспользуемся формулой:

$$Q = F \cdot v \cdot \mu, \quad (3)$$

где Q – тепловыделение, Вт; F – нагрузка на кулачок, Н; v – скорость скольжения пары трения, м/с; μ – коэффициент трения для пары материалов с соответствующей шероховатостью.

Для группы 1 ($\mu = 0,05$) и тепловыделение составило $Q = 100$ Вт, для группы 2 ($\mu = 0,07$) и $Q = 140$ Вт, а для группы 3 ($\mu = 0,09$) и $Q = 180$ Вт. Разница в тепловыделении между группами определялась по формуле:

$$\Delta Q = \frac{Q_{\text{группа3}} - Q_{\text{группа1}}}{Q_{\text{группа1}}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

Соответственно, разница в тепловыделении между группой 1 и группой 3 составила 80%. Снижение шероховатости до $Ra = 0,2 \dots 0,4$ мкм позволило уменьшить тепловыделение за счёт снижения трения.

Оценка экономической эффективности различных вариаций процесса обработки показала, что шлифование и полировка увеличивают затраты на производство изделия на 30% по сравнению с точением. Однако снижение износа и брака позволяет компенсировать дополнительные расходы уже через 1000 часов эксплуатации валов, обработанных шлифованием и полировкой.

Методы обработки исполнительных поверхностей коленчатых валов, также оказали значительное влияние на эксплуатационные характеристики. Так шлифование и полировка (группа 1) обеспечили наиболее равномерную структуру поверхностного слоя, что улучшило распределение смазочного материала. Это привело к снижению коэффициента трения и уменьшению локального перегрева в парах трения.

Дополнительно был проведен анализ остаточных напряжений, которые часто приводят к усталостным трещинам. Обработка с использованием соответствующего набора операций (группа 1) позволила минимизировать эти напряжения, что повлияло на ресурс работы валов, увеличив его до 1500 часов, в то время как в группе 3 развитие трещин началось уже через 500 часов.

Шлифование и полировка продемонстрировали свою эффективность в обеспечении долговечности и надёжности кулачковых валов.

Выводы.

Полученные данные подтверждают, что параметры шероховатости поверхности кулачковых валов играют ключевую роль в их износостойкости и долговечности. Более низкие значения шероховатости по параметру Ra уменьшают трение, что напрямую снижает износ и температуру в зоне трения. Экономическая эффективность методов обработки также оправдана, несмотря на увеличение приведенных затрат на производство ресурс повышается втрое.

Для дальнейшего повышения эксплуатационных характеристик кулачковых валов рекомендуется внедрение технологий лазерной обработки поверхности, что позволит достичь ещё более низких значений шероховатости без значительного увеличения стоимости производства.

Результаты исследования позволяют сделать выводы, что рациональный диапазон параметра шероховатости для кулачковых валов составляет $Ra = 0,2 \dots 0,4$ мкм.

Методы шлифования и полировки обеспечивают наилучшие эксплуатационные характеристики, снижая износ и тепловыделение.

Внедрение современных методов контроля шероховатости и автоматизации процессов обработки позволяет повысить надежность и долговечность продукции, одновременно снижая долю брака.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования данных рекомендаций для оптимизации производства и повышения качества изготовления кулачковых валов в промышленности.

Литература:

1. Бобровский Н.М. Исследование влияния режимов обработки на шероховатость поверхности закаленных валов в условиях массового производства / Н.М. Бобровский, П.А. Мельников, И.Н. Бобровский [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 5. – С. 40.
2. Бобровский И.Н., Зибров П.Ф., Бобровский Н.М., Гречников Ф.В. Исследование текстуры поверхности детали "коленчатый вал", обработанной шлифованием и выглаживанием // СТИН. – 2020. – № 6. – С. 7-10.
3. Пенкин Н.С. Основы трибологии и триботехники / Н.С. Пенкин, А.Н. Пенкин, В.М. Сербин. – Москва: Машиностроение, 2008. – 208 с.
4. Полюшкин Н.Г. Основы теории трения, износа и смазки: Учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 110800.62 "Агроинженерия" / Н.Г. Полюшкин. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2013. – 192 с.
5. Проскурин А.А., Каня В.А. Коленчатые валы двигателя внутреннего сгорания // Техника и технологии строительства. – 2017. – № 1(9). – С. 68-75.
6. Шабанов А.Ю., Зайцев А.Б., Рыженков Ю.В. Влияние состояния поверхностей трения двигателя внутреннего сгорания на износ деталей и характеристики его работы // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2008. – № 2(54). – С. 199-202.
7. Лялякин В.П., Аулов В.Ф. Технологические особенности восстановления шеек коленчатых валов в связи с их старением в процессе эксплуатации // Технический сервис машин. – 2024. – Т. 62, № 1. – С. 67-72.
8. Королев А.Е. Влияние погрешностей формы деталей на износ сопряжений двигателей // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2018. – № 3. – С. 45-48.

Analysis of the influence of surface roughness of camshafts on their wear resistance and durability

Arkhipov P.V.^{1,a}, Evtyukhina K.V.^{1,b}, Sinebryukhov S.A.^{1,c}, Shaletov E.P.^{1,d}, Ritter R.A.^{1,e}

¹Bratsk State University, st. Makarenko 40, Bratsk, Russia

^apavded@yandex.ru, ^bitinachii@gmail.com, ^csergeys33@mail.ru, ^dshaletov@yandex.ru,

^eritter.rodion020202@mail.ru

Keywords: camshafts, surface roughness, wear resistance, durability, processing methods.

The quality of the surface layer of parts, as a cumulative indicator, is one of the determining factors influencing the performance characteristics of the finished product in many industries. Camshafts are key elements of the valve timing mechanism of an internal combustion engine. They are subject to significant friction loads which makes, their surface quality a critical factor for reliable engine operation. The roughness of the camshaft actuator surfaces determines the level of friction, heat generation and wear, which affects the overall service life of the engine. The article analyzes the influence of camshaft surface roughness parameters on their wear resistance, heat generation and overall durability. The results of experimental studies of the dependence of some operational characteristics of camshafts on mechanical processing parameters are presented. The range of rational roughness values is determined, and recommendations are proposed for improving the production process to increase the reliability of products.

***КОНСТРУКЦИИ,
ТЕХНИЧЕСКИЕ И
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ
СВОЙСТВА
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ***

УДК 338.45

Комбинированная энергетика: разработка и внедрение

Аветисян А.С.^а

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

^аavetisyan_geven@mail.ru.

Ключевые слова: технология "vehicle-to-grid" (V2G), батареи электромобилей, пиковый спрос на электроэнергию, энергетические системы, оптимизация энергообеспечения.

Бурно развивающаяся революция в области электромобилей (EV) представляет собой двойную проблему и возможность: растущий спрос на электроэнергию требует модернизации электросетей. Электромобили, помимо простого потребления электроэнергии, в сочетании с технологией двунаправленной зарядки (vehicle-to-grid/V2G) и солнечными фотоэлектрическими системами могут превращаться в мобильные накопители энергии, предлагая привлекательное решение для управления энергопотреблением в жилых помещениях. Представьте, что вы используете сибирское солнце, накапливаете его в своем аккумуляторе для электромобилей, а затем без проблем питаете свой дом в часы пиковой нагрузки, эффективно превращая свой автомобиль в персональную электростанцию. Этот сдвиг парадигмы, вызванный растущим интересом водителей к удобству зарядки и расширенным функциональным возможностям электромобилей, выходит за рамки традиционных ограничений, связанных с аккумуляторами. Вместо пассивно припаркованных активов (занимающих 96% рабочего времени) электромобили, оснащенные интеллектуальными двунаправленными зарядными устройствами, становятся активными стабилизаторами электросети, динамически уравнивающими спрос и предложение.

В этом исследовании рассматривается потенциал технологии V2G не только для снижения затрат на электроэнергию в домашних хозяйствах, но и для повышения устойчивости электросетей, в частности, рассматривается ее применение в Иркутской области. Богатый потенциал солнечной энергетики региона в сочетании с растущим внедрением электромобилей создает уникальную возможность использовать системы V2G для более устойчивого и надежной энергетики будущего, снижая нагрузку на энергосистему и потенциально снижая зависимость от традиционных источников энергии. Оптимизируя взаимодействие между солнечными фотоэлектрическими батареями, электромобилями и технологией интеллектуальных сетей, Иркутская область может стать лидером в области децентрализованных решений в области возобновляемых источников энергии.

Технология Vehicle-to-Grid (V2G): путь к устойчивым энергетическим системам

По мере ускорения глобального перехода на электромобили (EVS) энергетический ландшафт претерпевает глубокие изменения. Помимо своей основной роли в качестве транспорта, электромобили предоставляют уникальную возможность революционизировать электросети с помощью технологии Vehicle-to-Grid (V2G). V2G позволяет электромобилям не только получать энергию из сети, но и возвращать ее обратно, эффективно превращая их в распределенные накопители энергии. Этот двунаправленный поток энергии обещает повысить стабильность электросети, снизить пиковый спрос, интегрировать возобновляемые источники энергии и создать новые источники дохода для владельцев электромобилей.

Понимание технологии V2G

По своей сути, V2G использует двунаправленные зарядные устройства, которые обеспечивают двусторонний поток электроэнергии между аккумулятором электромобиля и

электрической сетью [1]. При подключении к сети электромобили могут выполнять несколько ключевых функций:

- Снижение пиковой нагрузки: электромобили могут возвращать накопленную энергию обратно в сеть в периоды высокой нагрузки (часы пиковой нагрузки), снижая нагрузку на сеть и сводя к минимуму необходимость в дорогостоящих и часто загрязняющих окружающую среду пиковых электростанциях.
- Регулирование частоты: аккумуляторы EV могут быстро реагировать на колебания частоты сети, помогая поддерживать стабильное и надежное электроснабжение.
- Стабилизация электросети: обеспечивая поддержку реактивной мощности и напряжения, электромобили могут способствовать общей стабильности электросети, особенно в районах с высоким уровнем использования непостоянных возобновляемых источников энергии, таких как солнце и ветер.
- Интеграция возобновляемых источников энергии: системы V2G могут поглощать избыточную энергию, вырабатываемую возобновляемыми источниками, такими как солнце и ветер, когда предложение превышает спрос. Это помогает максимально эффективно использовать возобновляемые источники энергии и сокращать сокращение (растрату) чистой энергии.
- Аварийное резервное питание: электромобили могут служить источником резервного питания во время перебоев в электросетях, обеспечивая электроэнергией дома, предприятия или критически важную инфраструктуру.

Преимущества технологии V2G

Внедрение технологии V2G дает множество преимуществ:

- Снижение пикового спроса: Используя возможности накопителей энергии электромобилей, V2G может значительно снизить пиковый спрос на электроэнергию, снижая необходимость в дорогостоящей модернизации электросетей и строительстве новых электростанций.
- Повышенная стабильность электросети: V2G может повысить стабильность электросети, обеспечивая регулирование частоты, поддержку напряжения и реактивную мощность.
- Расширенная интеграция возобновляемых источников энергии: V2G облегчает интеграцию возобновляемых источников энергии, поглощая избыточную энергию и обеспечивая защиту от перебоев в работе.
- Экономические преимущества для владельцев электромобилей: владельцы электромобилей могут получать доход, участвуя в программах V2G, получая компенсацию за энергию, которую они возвращают в сеть.
- Снижение затрат на электроэнергию: Сбрасывая энергию в часы пиковой нагрузки и заряжая ее во внепиковое время, владельцы электромобилей могут воспользоваться тарифами с фиксированным временем использования и снизить свои счета за электроэнергию.
- Экологические преимущества: V2G может снизить зависимость от электростанций, работающих на ископаемом топливе, что приведет к снижению выбросов парниковых газов и улучшению качества воздуха.

Технология V2G в Иркутской области: гипотетический сценарий

Иркутская область, с ее обширной территорией, уникальным энергетическим ландшафтом (гидроэнергетика) и растущим интересом к устойчивому развитию, представляет как возможности, так и проблемы для внедрения V2G.

Возможности:

Интеграция гидроэнергетики: зависимость Иркутска от гидроэнергетики может быть дополнительно оптимизирована за счет использования V2G для управления колебаниями выработки энергии в зависимости от сезона. Электромобили могли бы накапливать

избыточную энергию в периоды высокой выработки гидроэнергии и сбрасывать ее в периоды низкой выработки.

Удаленные сообщества: V2G может стать надежным источником резервного питания для удаленных сообществ, которые не подключены к основной сети.

Потенциал микросетей: V2G может быть интегрирован в микросети, обеспечивая децентрализованный источник энергии и повышая энергетическую безопасность.

Экономическое развитие: Развитие технологии V2G может создать новые рабочие места и стимулировать экономический рост в Иркутской области.

Интеграция солнечной энергетики с V2G

Интеграция солнечной энергии с системами V2G обеспечивает синергетический подход к устойчивому управлению энергией. Избыточная солнечная энергия, вырабатываемая в течение дня, может накапливаться в аккумуляторах EV, а затем сбрасываться обратно в сеть в часы пиковой нагрузки или при низкой выработке солнечной энергии [2]. Эта модель "от солнечной энергии к транспортному средству и сети" (S2V2G) может значительно снизить зависимость от ископаемого топлива, снизить затраты на электроэнергию и повысить стабильность электросети. Она становится исключительно полезной там, где солнечные установки становятся все более распространенными в жилых домах.

Технология Vehicle-to-Grid (V2G) представляет собой смену парадигмы в наших представлениях об энергетике. Используя возможности электромобилей по накоплению энергии, V2G может повысить стабильность электросети, снизить пиковый спрос, интегрировать возобновляемые источники энергии и создать новые источники дохода для владельцев электромобилей. Поскольку количество электромобилей продолжает расти, V2G будет играть все более важную роль в построении более устойчивой и доступной энергетики будущего. Несмотря на сохраняющиеся проблемы, потенциальные преимущества V2G слишком значительны, чтобы их игнорировать. При правильной политике, инвестициях и инновациях V2G может помочь нам раскрыть весь потенциал электромобилей и создать более чистую и эффективную энергетическую систему для всех.

Внедрение распределенных решений в области солнечной энергетики представляет собой убедительный путь к более устойчивому и экономически обоснованному будущему, особенно в условиях растущего рынка электромобилей (EV). Помимо очевидных экологических преимуществ, использование солнечной энергии на месте потребления приносит ощутимые финансовые выгоды и повышает практичность владения электромобилями [3]. Сводя к минимуму потери при передаче энергии – распространенный недостаток централизованных электросетей – и устраняя зависимость от традиционных источников электроэнергии, распределенная солнечная генерация напрямую снижает эксплуатационные расходы владельцев электромобилей. Кроме того, это снижает нагрузку на стареющую и перегруженную сетевую инфраструктуру, устраняя необходимость в дорогостоящей и разрушительной крупномасштабной модернизации.

Рассмотрим ситуацию с типичным офисным зданием, в котором работают 60 сотрудников и для которого пиковая потребность в электроэнергии составляет 13 кВт. Интеграция даже небольшого парка из шести электромобилей, каждый из которых потребляет 3 кВт во время зарядки, может значительно увеличить пиковую нагрузку до 31 кВт. Этот скачок, превышающий мощность существующей системы на 25 кВА, потребует дорогостоящих улучшений инфраструктуры. Однако стратегически реализованная система солнечных панелей мощностью 15 кВт может эффективно компенсировать этот возросший спрос, обеспечивая устойчивое и экономичное решение, не требующее радикальных и дорогостоящих изменений в электросети. В сценариях, предполагающих более быструю зарядку и увеличение парка электромобилей, интеллектуальные системы управления нагрузкой и потенциальная модернизация распределительного устройства и сетевой инфраструктуры становятся критически важными для обеспечения сбалансированного и эффективного распределения энергии.

Большое внимание уделяется появлению технологии двунаправленной зарядки (Vehicle-to-Grid, или V2G), которая способна революционизировать взаимодействие электромобилей с электросетью. Производители-новаторы, такие как Ford (с F-150 Lightning) и Nissan (с Leaf), активно разрабатывают и внедряют автомобили с поддержкой V2G. Пилотный проект Nissan в Теннесси, в котором используется двунаправленная зарядка для питания офисных зданий, дает представление о преобразующем потенциале этой технологии. Однако широкому внедрению V2G по-прежнему препятствует отсутствие стандартизированных протоколов и нормативно-правовой базы. Несмотря на сохраняющиеся значительные препятствия, отраслевые эксперты ожидают повышения доступности и стандартизации технологий V2G в течение следующих 3-5 лет, что откроет путь для более широкого внедрения.

Важно отметить, что долговечность аккумуляторов остается первостепенной задачей для владельцев электромобилей. Со временем аккумуляторы постепенно разряжаются, обычно теряя 2-3% своей емкости при каждом полном цикле зарядки. Это может привести к заметному сокращению дальности хода. Например, электромобиль с первоначальным запасом хода в 240 км потенциально может потерять до 27 км в течение пяти лет из-за износа батареи. Кроме того, длительное хранение при полном заряде может ускорить износ батареи. Поэтому рекомендуется поддерживать уровень заряда аккумулятора в пределах 20-80%, когда это возможно, чтобы продлить срок службы аккумулятора.

Синергетическое сочетание двунаправленных зарядных устройств с установленными на месте солнечными панелями открывает значительные возможности для оптимизации энергопотребления и снижения зависимости от электросети. Технология V2G, позволяющая электромобилям как получать энергию из сети, так и подавать ее в сеть, в сочетании с солнечной генерацией может значительно повысить экологические показатели электромобилей и снизить эксплуатационные расходы. Для обеспечения плавного и успешного перехода к широкому внедрению электромобилей необходима активная разработка надежных решений по управлению энергопотреблением и адаптируемых тарифных структур. Эти инициативы должны уделять приоритетное внимание интеграции возобновляемых источников энергии в более широкую энергетическую экосистему, прокладывая путь к более чистому, устойчивому и экономически жизнеспособному транспорту будущего.

Литература:

1. Бушуев, В. В. Новая стадия глобализма и социо-природные циклы / В. В. Бушуев, Д. А. Соловьев // Окружающая среда и энергетика. – 2023. – № 1(17). – С. 15-27. – DOI 10.24412/2658-6703-2023-1-15-27.
2. Деревянко, В. А. Новые реалии региональной политики / В. А. Деревянко, С. В. Василенко, А. А. Слинько // Регион: системы, экономика, управление. – 2022. – № 1(56). – С. 36-40. – DOI 10.22394/1997-4469-2022-56-1-36-40.
3. Бодрунов, С. Д. Рождение новой эпохи: вызовы для России и мира / С. Д. Бодрунов // Научные труды Вольного экономического общества России. – 2022. – Т. 235, № 3. – С. 55-62. – DOI 10.38197/2072-2060-2022-235-3-55-62.

Combined energy industry: development and implementation

Avetisyan A.S.^a

Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, Russia
avetisyan_geben@mail.ru,

Keywords: vehicle-to-grid (V2G) technology, electric vehicle batteries, peak demand for electricity, energy systems, optimization of energy supply.

The booming electric vehicle (EV) revolution presents a dual challenge and opportunity: the growing demand for electricity requires the modernization of the power grid. In addition to simple electricity consumption, electric vehicles, combined with bi-directional charging technology (vehicle-to-grid/V2G) and solar photovoltaic systems, can turn into mobile energy storage devices, offering an attractive solution for energy management in residential areas. Imagine using the Siberian sun, storing it in your electric car battery, and then powering your home during peak hours without any problems, effectively turning your car into a personal power plant. This paradigm shift, driven by the growing interest of drivers in the convenience of charging and advanced functionality of electric vehicles, goes beyond the traditional limitations associated with batteries. Instead of passively parked assets (which occupy 96% of the working time), electric vehicles equipped with intelligent bidirectional chargers become active power grid stabilizers that dynamically balance supply and demand.

УДК 656

Повышение безопасности дорожного движения

Семыкина А.С.^{1,a}, Сердюк Д.А.^{1,b}, Артыков М.^{1,c}, Цой Е.А.^{1,d}, Петрук М.В.^{1,e}

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

^afantarock@mail.ru,

^bkb1-c2002@mail.ru,

^csdfmklsvdsklajlgre@mail.ru,

^dalexandrovich@gmail.com, ^emaksimpetruk8@gmail.com^e

Ключевые слова: организация дорожного движения, транспортная инфраструктура, безопасность дорожного движения, интеллектуальные транспортные системы, управление транспортными потоками, урбанизация, автоматизация, цифровизация, беспилотные транспортные средства, умный город.

Статья посвящена анализу организации дорожного движения в России, её эволюции за последнее десятилетие и перспективам развития. Рассматриваются ключевые аспекты, включая нормативно-правовую базу, технические средства и современные технологические решения. Проводится сравнительный анализ подходов к управлению транспортными потоками в разные периоды. Исследуются основные цели организации дорожного движения: повышение безопасности, оптимизация пропускной способности, снижение экономических и экологических потерь.

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

В условиях стремительной урбанизации и неуклонного роста автомобилизации населения России вопросы организации дорожного движения приобретают первостепенное значение для развития транспортной инфраструктуры страны [1]. Обширная территория Российской Федерации, разнообразие климатических условий и неравномерность распределения населения создают уникальные вызовы для специалистов и управленцев в сфере обеспечения безопасности, эффективности и устойчивости дорожного движения.

Организация дорожного движения в России представляет собой комплексную систему мероприятий, направленных на оптимизацию перемещения транспортных средств и пешеходов в рамках существующей дорожной сети. Эта многогранная деятельность охватывает широкий спектр аспектов: от проектирования и строительства дорожной

инфраструктуры в различных регионах страны до разработки и внедрения интеллектуальных систем управления трафиком в крупных мегаполисах [2].

За последнее десятилетие подходы к организации дорожного движения в России претерпели значительные изменения [3]. Технологический прогресс, развитие информационных технологий и растущее осознание экологических проблем привели к переосмыслению традиционных методов и стратегий в этой области. Современные решения все чаще опираются на анализ больших данных, применение искусственного интеллекта и внедрение автоматизированных систем управления, адаптированных к российским реалиям [14].

Актуальность исследования организации дорожного движения в России обусловлена не только необходимостью повышения безопасности и эффективности транспортных систем, но и стремлением к созданию более комфортной и экологически устойчивой городской среды [4,5]. В условиях растущей урбанизации и увеличения плотности населения в российских городах, оптимизация дорожного движения становится ключевым фактором в обеспечении качества жизни граждан и экономического развития регионов.

Данная статья ставит своей целью всесторонний анализ концепции организации дорожного движения в контексте российской действительности, рассмотрение ее основных целей и компонентов, а также исследование эволюции подходов к управлению транспортными потоками в России за последние 10 лет. Особое внимание будет уделено сравнительному анализу методов и технологий, применявшихся в прошлом, с современными инновационными решениями, реализуемыми в различных регионах страны. Такой подход позволит не только оценить достигнутый прогресс, но и наметить перспективы дальнейшего развития в этой критически важной области [6].

В контексте стремительно меняющегося мира и новых вызовов, стоящих перед транспортной отраслью России, понимание принципов и тенденций в организации дорожного движения становится необходимым условием для создания эффективных, безопасных и устойчивых транспортных систем будущего, способных удовлетворить уникальные потребности нашей страны.

В контексте российской действительности организация дорожного движения (ОДД) представляет собой комплексную систему мероприятий, направленных на обеспечение безопасного и эффективного функционирования транспортной инфраструктуры. Согласно Федеральному закону «Об организации дорожного движения в Российской Федерации» от 29.12.2017 N 443-ФЗ, ОДД определяется как деятельность по упорядочению движения транспортных средств и пешеходов на дорогах, направленная на снижение потерь времени (задержек) при движении транспортных средств и пешеходов, при условии обеспечения безопасности дорожного движения.

Повышение безопасности дорожного движения является наиважнейшей задачей для общества [7,8]. Данной теме посвящено множество научных трудов и публикаций различных авторов, но несмотря на это разработка мероприятий по улучшению дорожной ситуации и предотвращение возникновения дорожно-транспортных происшествий является актуальной задачей.

Ключевыми компонентами ОДД в России являются: материальное и инфраструктурное обустройство дорожного пространства, разработка и внедрение стандартов для транспортных средств и дорожной инфраструктуры, формирование и актуализация правил дорожного движения, осуществление надзора и контроля за соблюдением установленных норм, а также управление транспортными потоками с использованием современных технологий. Особую роль в этой системе играет ГОСТ Р 52289-2019 «Технические средства организации дорожного движения», регламентирующий применение дорожных знаков, разметки, светофоров и дорожных ограждений.

Основополагающими целями организации дорожного движения в Российской Федерации являются:

- повышение безопасности участников дорожного движения;

- оптимизация пропускной способности дорожной сети;
- минимизация экономических потерь;
- снижение негативного воздействия транспорта на окружающую среду.

Достижение этих целей осуществляется посредством реализации комплекса мер, включающих как инфраструктурные преобразования, так и внедрение инновационных технологий управления дорожным движением [9].

К основным мероприятиям по повышению безопасности дорожного движения относят:

- совершенствование транспортной инфраструктуры;
- обучение и своевременное информирование населения;
- повышение и контроль ответственности владельцев автомобилей и пешеходов;
- применение технических средств контроля;
- применение новых и актуальных современных технологий;
- проведение регулярного мониторинга и анализа;
- создание взаимодействия между органами власти и населением по вопросам

реализации комплексных программ по безопасности дорожного движения и т.д.

В области повышения безопасности движения Россия достигла значительных успехов. По данным Госавтоинспекции МВД России, за период с 2012 по 2022 год количество дорожно-транспортных происшествий с пострадавшими сократилось на 36,8%, а число погибших в ДТП уменьшилось на 44,7%. Этому способствовало внедрение автоматизированных систем фото- и видеофиксации нарушений ПДД, совершенствование дорожной инфраструктуры и повышение эффективности работы экстренных служб.

Повышение пропускной способности дорог в России осуществляется путем оптимизации организации дорожного движения с использованием интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Например, в Москве внедрена система адаптивного управления светофорами, которая анализирует транспортные потоки в режиме реального времени и корректирует режимы работы светофоров, что позволило увеличить пропускную способность улично-дорожной сети на 15-20%.

Эволюция организации дорожного движения в России за последние 10 лет характеризуется значительным технологическим прогрессом и изменением подходов к управлению транспортными потоками [10]. Если в начале 2010-х годов основной акцент делался на расширении дорожной сети и внедрении базовых элементов автоматизации, то к 2020-м годам произошел переход к комплексному применению цифровых технологий и интеллектуальных систем управления.

Десять лет назад основными инструментами ОДД были традиционные средства регулирования: дорожные знаки, разметка и светофоры с фиксированными циклами работы. Системы видеонаблюдения и фиксации нарушений ПДД только начинали массово внедряться в крупных городах. В это время активно развивалась нормативно-правовая база: в 2013 году были внесены существенные изменения в Федеральный закон «О безопасности дорожного движения», направленные на усиление ответственности за нарушения ПДД.

К 2019 году ситуация значительно изменилась. Был принят и вступил в силу Федеральный закон «Об организации дорожного движения в Российской Федерации», который законодательно закрепил понятие ИТС и определил основные направления развития ОДД. В крупных городах России начали активно внедряться системы адаптивного управления дорожным движением, использующие данные с датчиков транспортного потока и камер видеонаблюдения для оптимизации работы светофоров и информационных табло [11].

В настоящее время организация дорожного движения в России характеризуется широким применением цифровых технологий и элементов искусственного интеллекта. Активно развиваются проекты «Умный город», в рамках которых создаются единые центры управления дорожным движением, интегрирующие различные подсистемы ИТС. Например, в Москве функционирует Центр организации дорожного движения (ЦОДД), который в

режиме реального времени управляет более чем 2700 светофорами и 2000 камерами видеонаблюдения [1].

Особое внимание уделяется развитию систем информирования участников дорожного движения [12]. На федеральных трассах устанавливаются табло переменной информации, предоставляющие водителям актуальные данные о дорожной обстановке, погодных условиях и возможных затруднениях движения [13]. В крупных городах внедряются системы управления парковочным пространством, позволяющие оптимизировать использование парковочных мест и снизить нагрузку на улично-дорожную сеть.

Важным аспектом современной организации дорожного движения в России является интеграция различных видов транспорта. Развиваются системы «перехватывающих» парковок, создаются транспортно-пересадочные узлы, внедряются решения для приоритетного проезда общественного транспорта. Эти меры направлены на создание более сбалансированной и устойчивой транспортной системы, способной удовлетворить потребности растущих городских агломераций.

Вывод:

Успешное решение стоящих перед отраслью задач позволит создать в России современную, эффективную и устойчивую транспортную систему, способную удовлетворить потребности растущих городских агломераций и обеспечить высокое качество жизни граждан. При этом ключевым фактором успеха будет являться способность интегрировать передовые мировые практики с учетом специфики российских условий и имеющегося опыта в области организации дорожного движения.

Литература:

1. Владимиров, С. А. Интеллектуальные транспортные системы в дорожном движении: учебное пособие / С. А. Владимиров, В. А. Гудков, А. Б. Николаев. - М.: МАДИ, 2021. - 252 с.
2. ГОСТ Р 52289-2019 «Технические средства организации дорожного движения. Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств». - М.: Стандартинформ, 2020.
3. Государственная программа Российской Федерации «Развитие транспортной системы» (утв. постановлением Правительства РФ от 20 декабря 2017 г. № 1596).
4. Загородний, Н.А. Анализ факторов и показателей аварийности с участием средств индивидуальной мобильности (СИМ) в России / Н.А. Загородний, В.А. Шаповалова // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 1-2 (84). С. 43-50.
5. Загородний, Н.А. Проблемы и перспективы использования умных городских технологий в области безопасности дорожного движения / Н.А. Загородний, М.В. Головкин // В сборнике: Управление деятельностью по обеспечению безопасности дорожного движения: состояние, проблемы, пути совершенствования. Сборник материалов XVIII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. Орёл, 2024. С. 161-164.
6. Национальный проект «Безопасные качественные дороги» (паспорт утвержден президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам, протокол от 24.12.2018 № 16).
7. Официальный сайт Госавтоинспекции МВД России. URL: <http://www.gibdd.ru/> (дата обращения: 19.01.2025).
8. Распоряжение Правительства РФ от 25 марта 2020 г. № 724-р «Об утверждении Концепции обеспечения безопасности дорожного движения с участием беспилотных транспортных средств на автомобильных дорогах общего пользования».
9. Семькина, А.С. Повышение безопасности дорожного движения за счет снижения тяжести последствий ДТП / А.С. Семькина, Н.А. Загородний // Мир транспорта и технологических машин. - № 3(62) 2018. - С. 88-96.
10. Семькина, А.С. Экологические проблемы автомобильного транспорта и пути их решения / Семькина А.С., Каблучко И.П., Кобзарев С.В. // В сборнике: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Сборник докладов. Белгород, 2024. С. 161-165.
11. Федеральный закон «О безопасности дорожного движения» от 10.12.1995 N 196-ФЗ (с изменениями и дополнениями).

12. Федеральный закон «Об организации дорожного движения в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 29.12.2017 N 443-ФЗ.

13. Федеральный проект «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства» (утв. протоколом заседания проектного комитета по национальному проекту "Безопасные и качественные автомобильные дороги" от 20 декабря 2018 г. № 4).

14. Якимов, М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов: монография / М. Р. Якимов. - М.: Логос, 2013. - 188 с.

Improving road safety

Semykina A.S.^{1,a}, Serdyuk D.A.^{1,b}, Artykov M.^{1,c}, Tsoi E.A.^{1,d}, Petruk M.V.^{1,e}

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov»

^afantarock@mail.ru,

^bkb1-c2002@mail.ru,

^csdfmklsvdsklajlgre@mail.ru,

^dalexandrrovich@gmail.com, ^emaksimpetruk8@gmail.com

Keywords: traffic management, transport infrastructure, road safety, intelligent transport systems, traffic flow management, urbanization, automation, digitalization, unmanned vehicles, smart city.

The article is devoted to the analysis of traffic management in Russia, its evolution over the past decade and development prospects. Key aspects are considered, including the regulatory framework, technical means and modern technological solutions. A comparative analysis of approaches to traffic flow management in different periods is carried out. The main goals of traffic management are studied: increasing safety, optimizing throughput, reducing economic and environmental losses.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the federal program for supporting universities "Priority 2030" using equipment based on the High Technology Center of the BSTU named after V.G. Shukhov.

УДК 656

Развитие организации дорожного движения

Семыкина А.С.^{1,a}, Сердюк Д.А.^{1,b}, Артыков М.^{1,c}, Цой Е.А.^{1,d}, Петрук М.В.^{1,e}

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

^afantarock@mail.ru,

^bkb1-c2002@mail.ru,

^csdfmklsvdsklajlgre@mail.ru,

^dalexandrrovich@gmail.com, ^emaksimpetruk8@gmail.com

Ключевые слова: организация дорожного движения, транспортная инфраструктура, безопасность дорожного движения, интеллектуальные транспортные системы, управление транспортными потоками, урбанизация, автоматизация, цифровизация, беспилотные транспортные средства, умный город.

В статье рассматриваются современное состояние организации дорожного движения и перспективы развития. Перечислены основные направления развития организации дорожного движения, их реализация и достоинства после внедрения.

Рассматриваются вопросы обеспечения безопасности дорожного движения в будущем. Статья посвящена анализу организации дорожного движения в России, её эволюции за последнее десятилетие и перспективам развития.

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

В настоящее время организация дорожного движения в России характеризуется широким применением цифровых технологий и элементов искусственного интеллекта. Активно развиваются проекты «Умный город», в рамках которых создаются единые центры управления дорожным движением, интегрирующие различные подсистемы ИТС. Например, в Москве функционирует Центр организации дорожного движения (ЦОДД), который в режиме реального времени управляет более чем 2700 светофорами и 2000 камерами видеонаблюдения [1].

Первоочередным направлением развития безопасности дорожного движения является сохранение жизни и здоровья всех участников дорожного движения, а также имущества и транспортной инфраструктуры. Количество произошедших дорожно-транспортных происшествий влияет на социальное, экономическое и демографическое положение для государства. К основным видам возникающих дорожно-транспортных происшествий относят наезд на пешехода и столкновения транспортных средств. Причем наезд на пешеходов характеризуется таким из показателей как тяжесть последствий [2]. Для снижения возникновения аварийности на дорогах не хватает контрольно-надзорных механизмов за системой дорожного движения. Оценка состояния дорожного движения должна осуществляться на основе полученной информации и постоянного мониторинга системами контроля и видеонаблюдения [3].

К основным мерам повышения безопасности дорожного движения можно отнести совершенствование улично-дорожной сети, совершенствование организации дорожного движения, контроль за поведением водителей и пешеходов на дороге, а также совершенствование правил и требований законодательства по улучшению и повышению безопасности дорожного движения в целом и т.д.

Безопасности дорожного движения уделяется всегда повышенное внимание, но так как происходит совершенствование мира и общества, развитие городов и сел, то тех мер, которые применялись ранее по обеспечению безопасности на дорогах уже недостаточно, а так как рост автомобилей увеличивается с каждым годом, то требуется разработка новых мер, направленных на обеспечение безопасности дорожного движения [4].

Особое внимание уделяется развитию систем информирования участников дорожного движения [12]. На федеральных трассах устанавливаются табло переменной информации, предоставляющие водителям актуальные данные о дорожной обстановке, погодных условиях и возможных затруднениях движения [13]. В крупных городах внедряются системы управления парковочным пространством, позволяющие оптимизировать использование парковочных мест и снизить нагрузку на улично-дорожную сеть.

Важным аспектом современной организации дорожного движения в России является интеграция различных видов транспорта [5]. Развиваются системы «перехватывающих» парковок, создаются транспортно-пересадочные узлы, внедряются решения для приоритетного проезда общественного транспорта. Эти меры направлены на создание более сбалансированной и устойчивой транспортной системы, способной удовлетворить потребности растущих городских агломераций.

Перспективы развития организации дорожного движения в России тесно связаны с глобальными тенденциями в области транспортных технологий и урбанистики, но при этом учитывают специфику отечественной инфраструктуры и нормативно-правовой базы.

Ключевым направлением развития является дальнейшая цифровизация и интеллектуализация систем управления дорожным движением.

В рамках национального проекта «Безопасные качественные дороги» и федерального проекта «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства» предусмотрено масштабное внедрение интеллектуальных транспортных систем (ИТС) в городских агломерациях с населением свыше 300 тысяч человек. К 2024 году планируется реализовать не менее 64 таких проектов. ИТС будут включать в себя подсистемы управления светофорными объектами, детектирования дорожного движения, информирования участников дорожного движения и управления парковочным пространством [6].

Особое внимание уделяется развитию технологий обработки больших данных (Big Data) и искусственного интеллекта (ИИ) для прогнозирования и оптимизации транспортных потоков. Например, в Москве разрабатывается система, способная предсказывать загруженность дорог с точностью до 95% на срок до 20 минут вперед. Подобные технологии позволят более эффективно управлять дорожным движением, снижая вероятность возникновения заторов и повышая общую пропускную способность улично-дорожной сети.

Важным аспектом будущего развития организации дорожного движения является интеграция беспилотных транспортных средств в существующую инфраструктуру. В соответствии с Распоряжением Правительства РФ от 25 марта 2020 г. № 724-р, утвердившим Концепцию обеспечения безопасности дорожного движения с участием беспилотных транспортных средств на автомобильных дорогах общего пользования, предполагается поэтапное внедрение беспилотников в транспортную систему страны. Это потребует существенной модернизации систем управления дорожным движением, включая создание высокоточных цифровых карт, развитие сетей 5G для обеспечения связи между транспортными средствами и инфраструктурой (V2X - Vehicle-to-Everything), а также адаптацию нормативно-правовой базы [7,8].

Развитие концепции «умного города» в России предполагает создание единых цифровых платформ управления городской инфраструктурой, включая транспортную систему. В рамках этого направления планируется интеграция различных подсистем ИТС, систем управления общественным транспортом, парковочным пространством и экологического мониторинга. Это позволит оптимизировать транспортные потоки не только с точки зрения эффективности движения, но и с учетом экологических факторов, что особенно актуально в контексте реализации Парижского соглашения по климату, ратифицированного Россией в 2019 году [9].

Одним из перспективных направлений является развитие мультимодальных транспортных систем, предполагающих эффективную интеграцию различных видов транспорта. В крупных городах России планируется создание интеллектуальных транспортно-пересадочных узлов, обеспечивающих быструю и удобную смену вида транспорта. Это потребует разработки комплексных систем информирования пассажиров и управления пассажиропотоками, учитывающих данные о загруженности различных видов транспорта в режиме реального времени.

В области повышения безопасности дорожного движения перспективным направлением является развитие систем активной безопасности транспортных средств и их интеграция с дорожной инфраструктурой. Планируется внедрение технологий предупреждения столкновений, основанных на обмене данными между автомобилями и элементами дорожной инфраструктуры. Это потребует создания надежных систем связи и обработки данных, способных обеспечить минимальные задержки при передаче критически важной информации [10].

Особое внимание в перспективе будет уделяться экологическим аспектам организации дорожного движения. Планируется развитие инфраструктуры для электротранспорта, включая создание сети зарядных станций и внедрение систем приоритетного проезда для экологически чистых транспортных средств. Также рассматривается возможность внедрения динамического управления дорожным движением с

учетом экологических параметров, таких как уровень загрязнения воздуха в различных районах города [11].

Перспективы развития организации дорожного движения в России связаны с дальнейшей цифровизацией и интеллектуализацией управления транспортными потоками, интеграцией беспилотных транспортных средств, развитием мультимодальных транспортных систем и повышением экологичности городского транспорта. Реализация этих направлений потребует не только технологических инноваций, но и совершенствования нормативно-правовой базы, а также подготовки квалифицированных кадров в области интеллектуальных транспортных систем [12,13].

Эволюция организации дорожного движения в России за последнее десятилетие демонстрирует значительный прогресс в области внедрения современных технологий и методов управления транспортными потоками. Переход от локальных решений к комплексному, системному подходу, основанному на широком применении информационных технологий и интеллектуальных систем управления, позволил существенно повысить эффективность и безопасность дорожного движения в крупных городах страны [14].

Вывод:

Достигнутые результаты, такие как снижение количества ДТП и повышение пропускной способности дорожной сети, свидетельствуют об эффективности принятых мер. Однако перед специалистами в области организации дорожного движения стоят новые вызовы, связанные с необходимостью адаптации транспортной инфраструктуры к быстро меняющимся технологиям и растущим потребностям общества.

Успешное решение стоящих перед отраслью задач позволит создать в России современную, эффективную и устойчивую транспортную систему, способную удовлетворить потребности растущих городских агломераций и обеспечить высокое качество жизни граждан. При этом ключевым фактором успеха будет являться способность интегрировать передовые мировые практики с учетом специфики российских условий и имеющегося опыта в области организации дорожного движения.

Литература:

- 1.Владимиров, С. А. Интеллектуальные транспортные системы в дорожном движении: учебное пособие / С. А. Владимиров, В. А. Гудков, А. Б. Николаев. - М.: МАДИ, 2021. - 252 с.
2. ГОСТ Р 52289-2019 «Технические средства организации дорожного движения. Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств». - М.: Стандартинформ, 2020.
3. Государственная программа Российской Федерации «Развитие транспортной системы» (утв. постановлением Правительства РФ от 20 декабря 2017 г. № 1596).
4. Загородний, Н.А. Анализ факторов и показателей аварийности с участием средств индивидуальной мобильности (СИМ) в России / Н.А. Загородний, В.А. Шаповалова // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 1-2 (84). С. 43-50.
5. Загородний, Н.А. Проблемы и перспективы использования умных городских технологий в области безопасности дорожного движения / Н.А. Загородний, М.В. Головкин // В сборнике: Управление деятельностью по обеспечению безопасности дорожного движения: состояние, проблемы, пути совершенствования. Сборник материалов XVIII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. Орёл, 2024. С. 161-164.
6. Национальный проект «Безопасные качественные дороги» (паспорт утвержден президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам, протокол от 24.12.2018 № 16).
7. Официальный сайт Госавтоинспекции МВД России. URL: <http://www.gibdd.ru/> (дата обращения: 19.01.2025).
8. Распоряжение Правительства РФ от 25 марта 2020 г. № 724-р «Об утверждении Концепции обеспечения безопасности дорожного движения с участием беспилотных транспортных средств на автомобильных дорогах общего пользования».

9. Семькина, А.С. Повышение безопасности дорожного движения за счет снижения тяжести последствий ДТП / А.С. Семькина, Н.А. Загородний // Мир транспорта и технологических машин. - № 3(62) 2018. - С. 88-96.

10. Семькина, А.С. Экологические проблемы автомобильного транспорта и пути их решения / Семькина А.С., Каблучко И.П., Кобзарев С.В. // В сборнике: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Сборник докладов. Белгород, 2024. С. 161-165.

11. Федеральный закон «О безопасности дорожного движения» от 10.12.1995 N 196-ФЗ (с изменениями и дополнениями).

12. Федеральный закон «Об организации дорожного движения в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 29.12.2017 N 443-ФЗ.

13. Федеральный проект «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства» (утв. протоколом заседания проектного комитета по национальному проекту "Безопасные и качественные автомобильные дороги" от 20 декабря 2018 г. № 4).

14. Якимов, М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов: монография / М. Р. Якимов. - М.: Логос, 2013. - 188 с.

Development of traffic management

Semykina A.S.^{1,a}, Serdyuk D.A.^{1,b}, Artykov M.^{1,c}, Tsoi E.A.^{1,d}, Petruk M.V.^{1,e}

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov»

^afantarock@mail.ru,

^bkb1-c2002@mail.ru,

^csdfmklsvdsklajlgre@mail.ru,

^dalexandrrovich@gmail.com, ^emaksimpetruk8@gmail.com

Keywords: traffic management, transport infrastructure, road safety, intelligent transport systems, traffic flow management, urbanization, automation, digitalization, unmanned vehicles, smart city.

The article discusses the current state of traffic management and development prospects. The main directions of development of traffic management, their implementation and advantages after implementation are listed. The issues of ensuring road safety in the future are being considered. The article is devoted to the analysis of traffic management in Russia, its evolution over the last decade and development prospects.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the federal program for supporting universities "Priority 2030" using equipment based on the High Technology Center of the BSTU named after V.G. Shukhov.

УДК 629.33

Целесообразность проведения технического обслуживания автомобилей

Семькина А.С.^{1,a}, Омельченко Г.Д.^{1,b}, Артыков М.^{1,c}, Цой Е.А.^{1,d}, Андреева С.О.^{1,e}

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

^afantarock@mail.ru,

^bgeorgijomelcenko2@gmail.com,

^csdfmklsvdsklajlgre@mail.ru,

^dalexandrrovich@gmail.com, ^esandreeva815@gmail.com

Ключевые слова: автомобиль, техническое обслуживание, надежность, эксплуатация автомобиля, расходные материалы для проведения технического обслуживания.

В статье рассматривается важность, значимость и необходимость проведения периодического технического обслуживания автомобилей. Установлено, что регулярное проведение технического обслуживания автомобилей влияет на техническое состояние автомобиля в целом и на безопасность всех участников дорожного движения.

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

С развитием автомобильного транспорта появляется необходимость в совершенствовании технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) их агрегатов, сборочных единиц, узлов и деталей. Появляется необходимость изменения всего производственного процесса восстановления утраченного автомобилями ресурса. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей является необходимостью и основывается на техническом и экономическом прогрессе в автомобилестроении страны в целом.

На износостойкость и долговечность агрегатов автомобилей влияют различные условия эксплуатации, конструктивные особенности автомобилей, прочностные характеристики и свойства материалов, из которых изготовлены узлы и детали автомобилей, экологическая обстановка, условия работы автомобилей и другие факторы. Износ агрегатов и узлов автомобилей ухудшает техническое состояние автомобиля в целом, что требует проведения замены детали на новую или ее ремонт. Для предотвращения возникновения большого количества отказов агрегатов автомобиля необходимо проводить регулярное техническое обслуживание и планово-предупредительные ремонты.

Автомобили уже давно стали неотъемлемой частью современной жизни человека, предоставляя удобство и мобильность в повседневной деятельности. Однако для поддержания их функциональности, надёжности и долговечности, требуется проведение регулярного периодического технического обслуживания. Одним из ключевых аспектов технического обслуживания транспорта является своевременная замена расходных материалов. К ним относим: моторное масло, фильтры (масляный, воздушный, салонный, топливный), тормозные колодки, свечи зажигания, технические жидкости (тормозная, охлаждающая, жидкость ГУР, а также жидкость стеклоомывателя) ремни и другие компоненты. Своевременность и качество выполнения этих работ имеют огромное значение для автомобиля [1]. Данная статья рассматривает ключевые причины, по которым необходимо выполнять замену расходных материалов в срок и почему так важно обращаться к квалифицированным специалистам.

Одно из главных причин перехода к регулярной замене расходных материалов является обеспечение безопасности водителя, пассажиров и других участников дорожного движения [2]. Например, изношенные тормозные колодки или тормозная жидкость, утратившие свои свойства, могут привести к снижению эффективности торможения, что увеличивает риск аварийных ситуаций. Подобные компоненты напрямую влияют на жизненно важные системы автомобиля, а их несвоевременная замена может поставить под угрозу безопасность не только водителя, но и других участников дорожного движения.

Кроме того, изношенные шины и старый ремень ГРМ также представляет собой угрозу. При его обрыве ремня ГРМ может произойти значительные повреждения двигателя, в том числе, потеря управления транспортным средством, что крайне опасно при движении на высокой скорости [3,4].

Такие риски можно минимизировать, если выполнять рекомендованные автопроизводителем интервалы проведения технического обслуживания автомобиля.

Своевременная замена расходных материалов помогает увеличить срок службы автомобиля [5]. Начнём с моторного масла. Его основная функция это - смазка и предотвращение трения между металлическими деталями двигателя. Если масло не заменить в срок, предусмотренный заводом изготовителем, то оно начинает терять свои смазочные свойства, что может привести к ускоренному износу двигателя. Замена моторного масла, а также масляного фильтра позволяет защитить двигатель от чрезмерных нагрузок и перегрева.

Что же касается воздушного фильтра. Он защищает двигатель от попадания мелких частиц грязи и пыли [6]. Грязный фильтр не менее опасен для автомобиля. С таким фильтром в топливно-воздушную смесь попадает меньше воздуха, что негативно сказывается на работе двигателя, увеличивая расход топлива и выброс вредных веществ в атмосферу.

Игнорирование замены расходных материалов приводит к значительным финансовым затратам в будущем. При регулярной замене масла, фильтров, свечей зажигания или тормозных колодок, эксплуатация автомобиля обходится существенно дешевле, чем капитальный ремонт двигателя или всего автомобиля в случае ДТП [7].

Не меньшего внимания к себе требует система охлаждения. Давно не менявшийся антифриз, мало того, что теряет свои свойства, так и увеличивает шанс перегрева двигателя, что часто требует дорогостоящего ремонта или полной замены ДВС.

Обращение к квалифицированным автомеханикам помогает заранее выявить потенциальные проблемы и избежать крупных затрат в будущем.

Не только исправность, но и экологическая безопасность зависит от состояния компонентов автомобиля [8].

К примеру: старое моторное масло, коптящие и дымящие выхлопные газы, из-за старых фильтров и неисправностей в системе зажигания, увеличивают выбросы вредных веществ и ухудшают экологическую обстановку.

Не менее важной частью проведения технического обслуживания автомобиля является техническое обслуживание у высококвалифицированных специалистов и в сертифицированных автосервисах, что позволяет избежать негативных последствий в ходе некачественного ремонта.

Неквалифицированный персонал может использовать детали и комплектующие ненадлежащего качества, что ухудшит работу автомобиля. Моторное масло другой вязкости может навредить двигателю, а поддельные и некачественные запчасти увеличивают риски возникновения отказов и неисправностей, и соответственно, снижает надёжность автомобиля.

Проверенные и квалифицированные автосервисы, в свою очередь используют оригинальные компоненты или качественные аналоги, соблюдают регламент производителя и могут диагностировать скрытые проблемы. Кроме того, такие специалисты дают гарантию на выполненную работу, что добавляет уверенности владельцу автомобиля [9].

Своевременная замена расходных материалов и комплектующих, а также качественное проведение технического обслуживания автомобиля играют важную роль в сохранении его остаточной стоимости. При продаже автомобиля потенциальные покупатели, обращают внимание на его состояние, а также проверяют историю проведения технического обслуживания. Наличие подтверждения регулярной замены комплектующих и расходных материалов у квалифицированных специалистов существенно увеличивает шансы на быструю продажу автомобиля [10].

Вывод:

Регулярная и своевременная замена комплектующих и расходных материалов автомобиля - это один из фундаментальных элементов технического обслуживания, который обеспечивает безопасность, надёжность, работоспособность и долговечность, продлевает срок службы транспортного средства, а так же снижает финансовые затраты на ремонт и способствует поддержанию экологической безопасности. Обращение к квалифицированным специалистам не только помогает снизить временные и материальные затраты, но и даёт

полную уверенность в надёжности автомобиля. Возникающие отказы и неисправности автомобилей несут опасность не только для водителя, но и для всех окружающих участников дорожного движения.

Поэтому техническое обслуживание необходимо производить на регулярное основе и в соответствии с требованиями и правилами, установленными заводом-изготовителем.

Литература:

1. Семькина, А.С. Неисправности современных автомобилей. Применение компьютерных программ для расчета технических параметров поршня // В сборнике: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2016. С. 1751-1756;
2. Жердицкий Н.Р. Автосервис и фирменное обслуживание автомобилей: учебное пособие / Н. Т. Жердицкий, В. З. Русаков, А. А. Голованов; Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2020. – 123 с.
3. Коняхина Т.Б. Исследование рынка обслуживания автотранспортных средств в России / Т.Б. Коняхина, И.В. Панасенко, О. Н. Недзельская, Ю. С. Анохина // Молодой ученый. – 2021. – № 18 (204). – С. 336-338.
4. Карнаухова В.К. Сервисная деятельность / В.К. Карнаухова, Т.А. Краковская. – М.: Ростов-на-Дону: МАРТ, 2019. – 256 с.
5. Рыжая А.А. Состояние рынка технического обслуживания и ремонта автомобильного транспорта в России / А.А. Рыжая, Е.В. Белякова, С.С. Добрачев // В сборнике: Молодые ученые в решении актуальных проблем науки. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с Международным участием). Красноярск, 2022. С. 1095-1097.
6. Токарев А.Н. Основы теории надежности и диагностика. Учебное пособие. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008. - 226 с.
7. Кокорев, Г.Д. Повышение эффективности процесса технической эксплуатации автомобильного транспорта в сельском хозяйстве / Г.Д. Кокорев // В сборнике: Актуальные проблемы аграрной науки. Материалы международной юбилейной научно-практической конференции, посвященной 60-летию Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. 2009. С. 166-177.
8. Бышов, Н.В. Повышение эффективности технической эксплуатации автомобилей / Н.В. Бышов, Д.Г. Кокорев, А.И. Успенский, К.Г. Рембалович, А.И. Юхин // Сельский механизатор. 2015. № 7. С. 38-39.
9. Жильцов С.Н., Альбекров Д.Э. Повышение ресурса двигателей при капитальном ремонте // Проблемы технического сервиса в АПК: сб. науч. тр. Кинель: ИБЦ Самарского ГАУ, 2022 С. 7-12;
10. Семькина, А.С. Повышение эффективности технической эксплуатации карьерного автомобильного транспорта / А.С. Семькина, Н.А. Загородний, А.А. Конев // Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 3-5 (82). С. 26-33.

Feasibility of Car Maintenance

Semykina A.S.^{1,a}, Omelchenko G.D.^{1,b}, Artykov M.^{1,c}, Tsoi E.A.^{1,d}, Andreeva S.O.^{1,e}

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov"

^afantarock@mail.ru,

^bgeorgijomelcenko2@gmail.com,

^csdfmklsvdsklajlgre@mail.ru,

^dalexandrovich@gmail.com, ^esandreeva815@gmail.com

Keywords: car, maintenance, reliability, car operation, consumables for maintenance.

The article discusses the importance, significance and necessity of periodic car maintenance. It has been established that regular car maintenance affects the technical condition of the car as a whole and the safety of all road users.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the implementation of the federal program for supporting universities "Priority 2030" using equipment based on the High Technology Center of the V.G. Shukhov BSTU.

УДК 656.1/.5

Исследования физико-механических параметров трансмиссионного смазочного материала гидромеханических коробок передач автобусов в процессе эксплуатации

Орехов В.В.^{1,а}

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2-я Красноармейская ул., д. 4, Санкт-Петербург, Россия

^а vitalik.orehov95@mail.ru

Ключевые слова: автобус, гидромеханическая коробка передач, смазочный материал трансмиссии, полно факторный эксперимент, триботехнический параметр, машина трения, регрессионный метод.

В данной работе исследуются физико-механические (триботехнические) характеристики, в частности, коэффициент трения в системе жидкостного трибосопряжения, при различных уровнях наработки трансмиссионного масла Valvoline Light & HD ATF-CVT, используемого в гидромеханических коробках передач (ГМКП) ZF Ecoliaif 6AP1700B городских автобусов. Исследования проводились с использованием оборудования для анализа триботехнических параметров материалов.

Был осуществлён полный факторный эксперимент (ПФЭ) на машине трения 2070 СМТ-1 в соответствии с заранее составленной матрицей планирования эксперимента. Для обработки полученных выходных данных и создания математической модели, описывающей функцию отклика исследуемого процесса, применён математико-статистический (регрессионный) метод расчётов.

Разработана эмпирически подтвержденная математическая модель, показывающая зависимость изменения коэффициента трения от наработки в исследуемом узле трения ГМКП ZF Ecoliaif 6AP1700B. Также представлена геометрическая поверхность корреляционной связи между входными управляемыми параметрами и выходным параметром эксперимента, а также поверхность реакции, основанная на построенной математической модели исследуемой системы трибосопряжения.

Введение.

Изменение состояния масла при деградации основных физических параметров и накоплении продуктов износа, частиц песка дорожной грязи и воды влияет на интенсивность износа сопрягаемых триботехнических пар фрикционных муфт гидромеханической коробки передач.

Как следствие, данный износ приводит к преждевременному отказу гидромеханической коробки передач городского автобуса.

Поэтому, с целью исследования узла на износостойкость, необходимо на различных нагрузочных режимах при различном наработанном состоянии масла провести

эксперименты. За оценочный показатель характеризующий износ в данных экспериментах принимается коэффициент трения в системе жидкостного трибосопряжения.

В качестве узла исследования выбрано сопряжение фрикционных элементов муфты сцепления: «фрикционная накладка диска первичного вала (фрикционный диск с внутренним зубчатым венцом) – масло – стальная поверхность фрикционного диска вторичного вала (фрикционный диск с наружным зубчатым венцом). Материалы трения (металлокерамический материал на основе графита и сталь Ст45).

Схема исследуемого натурального узла трения представлена на рисунке 1.

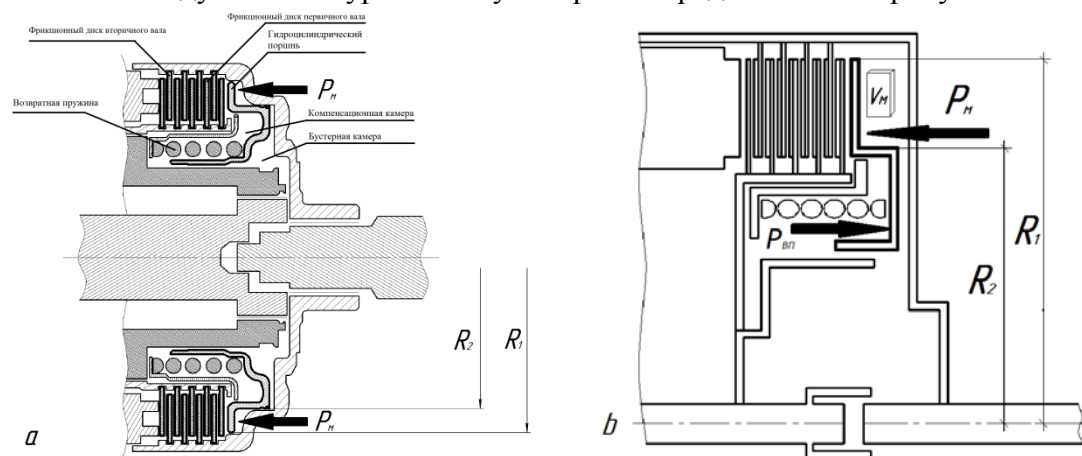


Рис. 1 – Схема исследуемого натурального узла трения

a – конструктивная схема; b – кинематическая схема;

R_1 – внешний радиус гидроцилиндрического поршня; R_2 – внутренний радиус поршневой плоскости воспринимающей давление масла; P_m – рабочее давление масла, подаваемое для включения муфты; V_m – рабочий объем масла под давлением.

Для обеспечения соответствия пары трения натурному узлу по кинематическому признаку – образец из которого выполнена вращающаяся деталь наиболее подверженная износу в натурном узле применена в качестве неподвижного элемента в виде колодки, а в качестве вращающегося элемента применен ролик из стали 45 соответствующий детали наименее подверженной износу в натурном узле.

Построение матрицы ПФЭ.

Для построения матрицы планирования ПФЭ были определены управляемые входных параметры - номинальные значения нагрузки, (P) и частоты вращения, (n) подаваемые на ролик по исследуемой схеме контактной пары трения.

Схема типа исследуемой контактной пары трения – «ролик-колодка» представлена на рисунке 2.

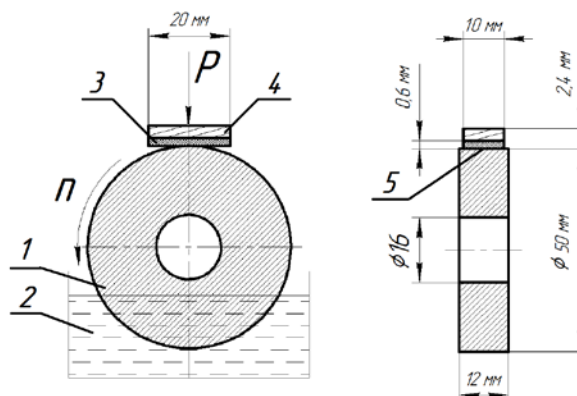


Рис. 2 – Схема типа сопряжения контактной пары трения – «ролик-колодка»

1 – ролик; 2 – смазывающая жидкость; 3 – фрикционный материал колодки; 4 – стальная основа колодки; 5 – место контакта трения

Подаваемая нагрузка на ролик равна силе сжатия фрикционных дисков в процессе включения муфты сцепления «А» ГМКП ZF Ecolife 6AP1700B, рассчитанная по формуле [1,2,3]:

$$P_{сф} = P_{он} - P_{ен} = p \cdot S_{zn} - \frac{G \cdot d^4 \cdot (H_0 - H_1)}{8 \cdot (D_1 - d)^3 \cdot n}, \quad (1)$$

где $P_{он}$ – сила действия гидроцилиндрического поршня, равная силе давления рабочей жидкости на поршневую плоскость воспринимающей давление жидкости, Н; $P_{ен}$ – сила возвратной пружины, Н.

Частота вращения определена согласно руководству по эксплуатации ГМКП ZF-Ecolife и собранной статистики работы данной ГМКП в процессе проведенных подконтрольных эксплуатационных испытаний трансмиссионного масла.

Основные характеристики плана проведения ПФЭ представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики плана проведения ПФЭ

Значение варьируемых факторов	Кодовое обозначение	Частота вращения, об/мин.	Нагрузка, Н.
		X_1	X_2
Основной уровень	0	675	4010
Верхний уровень	+1	700	4390
Нижний уровень	-1	650	3630
Интервал варьирования	Δx_i	25	380

Для ведения эксперимента применен план с двухуровневой системой измерений факторов [4], согласно которому составлена матрица планирования эксперимента, в соответствии с которой проведены экспериментальные испытания. Результаты эксперимента в виде выходных параметров зафиксированы в матрице.

Матрица планирования и экспериментальные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Матрица планирования и экспериментальные результаты

Наименование марки масла	Наработка масла, км	Номер опыта	X_0	X_1	X_2	Результаты серий измерений (параллельных опытов)		
						Момент трения, кг·мм		
						$\tilde{y}_i$		
						1	2	3
Valvoline Light Heavy Duty ATF/CVT	0	1	+1	-1	-1	725	710	715
		2	+1	-1	+1	750	741	742
		3	+1	+1	-1	730	722	725
		4	+1	+1	+1	767	750	752
	15000	1	+1	-1	-1	700	683	689
		2	+1	-1	+1	740	722	729
		3	+1	+1	-1	710	692	699
		4	+1	+1	+1	740	722	729
	30000	1	+1	-1	-1	710	692	699
		2	+1	-1	+1	740	722	729
		3	+1	+1	-1	715	697	704
		4	+1	+1	+1	745	726	734
	45000	1	+1	-1	-1	720	702	709
		2	+1	-1	+1	750	731	739
		3	+1	+1	-1	722	704	711
		4	+1	+1	+1	760	471	748
	60000	1	+1	-1	-1	730	712	719

Наименование марки масла	Наработка масла, км	Номер опыта	x_0	x_1	x_2	Результаты серий измерений (параллельных опытов)		
						Момента трения, кг·мм		
						$\tilde{y}_i$		
						1	2	3
	2		+1	-1	+1	760	741	748
	3		+1	+1	-1	740	722	729
	4		+1	+1	+1	770	751	758

Геометрическая модель поля корреляционной связи между входными управляемыми параметрами и выходным параметром эксперимента представлена на рисунке 3.

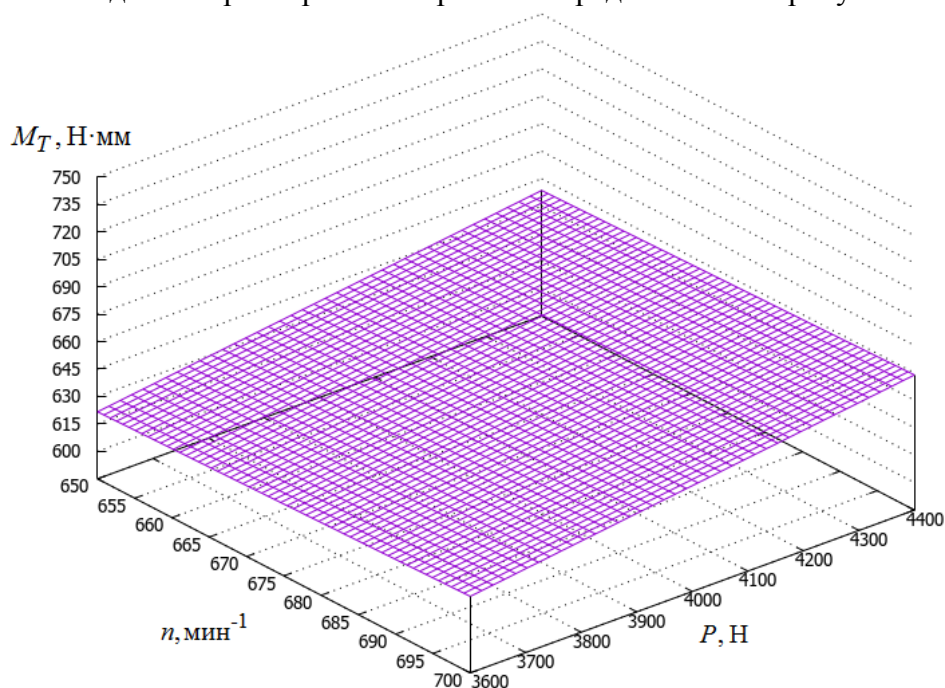


Рис. 3 – Геометрическая модель поля корреляционной связи между входными управляемыми параметрами и выходным параметром эксперимента

Представленная поверхность показывает поле полученных корреляционных значений в пространстве между входными и выходным параметрами исследуемого процесса.

Построение математической модели.

Полученные выходные параметры исследуемого процесса обработаны с помощью математико-статистического метода по расчётным формулам регрессионного анализа, результаты которого позволили построить математические модели проведенных экспериментов над маслами с различной наработкой.

Полученные математические модели:

$$\hat{y} = 560,09 + 0,03 \cdot x_2 - 0 \text{ км наработки};$$

$$\hat{y} = 529,33 + 0,05 \cdot x_2 - 15 \text{ тыс.км наработки};$$

$$\hat{y} = 560,34 + 0,04 \cdot x_2 - 30 \text{ тыс.км наработки};$$

$$\hat{y} = 551,33 + 0,04 \cdot x_2 - 45 \text{ тыс.км наработки};$$

$$\hat{y} = 565,23 + 0,04 \cdot x_2 - 60 \text{ тыс.км наработки}.$$

Графическая интерпретация построенных математических моделей представлена на рисунке 4.

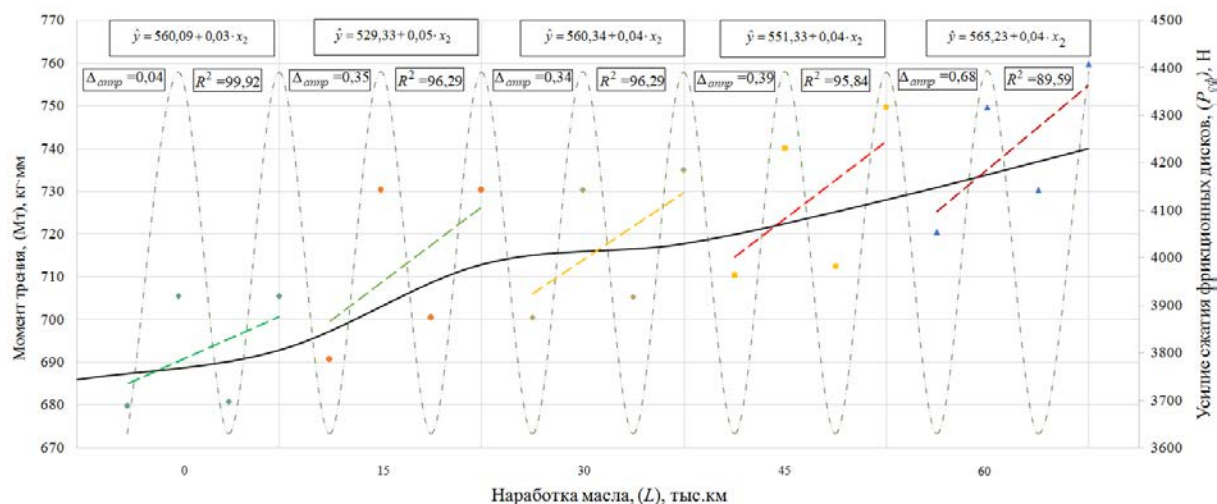


Рис. 4 – Графическая интерпретация построенных математических моделей

Данные модели достаточно адекватно и качественно описывает искомую функцию отклика, выражая реальную зависимость исследуемого процесса для дальнейшего его прогнозирования.

Оценочным исследуемым показателем интенсивности износа принят коэффициент трения сопрягаемых триботехнических пар, который имеет прямую корреляционную связь с выходным параметром - моментом трения, построенных математических моделей.

Проведя расчет, получим эмпирическую зависимость коэффициента трения от наработки, по формуле [5,6]:

$$k_T = \frac{P_T}{P}, \quad (2)$$

где P – нагрузка, подаваемая на ролик, Н; P_T – сила трения, Н.

По полученной зависимости построена общая математическая модель функции отклика исследуемого процесса.

$$k_T = 0,0748 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot L - 9 \cdot 10^{-6} \cdot L^2 + 1 \cdot 10^{-7} \cdot L^3.$$

Геометрическое представление поверхности реакции математической модели исследуемой системы трибосопряжения представлено на рисунке 5.

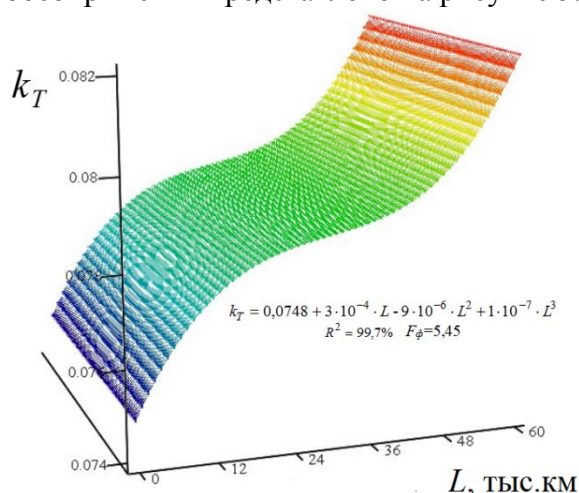


Рис. 5 – Геометрическое представление поверхности реакции математической модели исследуемой системы трибосопряжения

Построенная математическая модель достаточно адекватно и качественно описывает функциональную физическую зависимость исследуемого процесса для дальнейшего его прогнозирования при эксплуатации ГМКП ZF Ecoliaif 6AP1700B на городских автобусах.

Заключение.

Определено количество входных управляемых переменных (факторов), воздействующих на выходной параметр построенных математических моделей исследуемого процесса. Вычислено количество опытов необходимых для каждой пробы исследуемого масла - Valvoline Light & HD ATF-CVT, полученной в соответствии с разработанной методикой проведения ресурсных подконтрольных испытаний.

Собраны значения выходных параметров процесса, в ходе проведения полно факторного эксперимента на машине трения 2070 СМТ-1.

Разработана эмпирически подтвержденная математическая модель – зависимости процесса изменения коэффициента трения от наработки в исследуемом узле трения ГМКП ZF Ecoliaif 6AP1700B. Данная модель достаточно адекватно и качественно описывает функциональную зависимость исследуемого отклика, выражая реальную зависимость процесса для дальнейшего его прогнозирования при эксплуатации агрегата.

Таким образом, по построенной эмпирической математической модели достоверность полученных экспериментальных результатов подтверждается. Данные результаты являются важной частью ресурсных научно-технических изысканий, по разработке корректирующего коэффициента сервисного интервала замены трансмиссионного масла, который будет учитывать критерии фактического состояния масла для ГМКП в процессе городской эксплуатации автобусов.

В ходе дальнейших исследований планируется установить браковочное значение коэффициента трения исследуемой триботехнической пары.

Литература:

1. Песков В. И., Конструкция автомобильных трансмиссий: учебное пособие / В.И. Песков. — Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2023. — 146 с. ISBN 978-5-16-016247-8.
2. Глубокий В.И., Расчет гидравлических приводов станочного оборудования: Учебно-метод. пособие по курсовому проектированию по дисц. «Гидропривод и гидропневмоавтоматика» для студ. машиностроит. спец. / В.И. Глубокий. — Мн.: БНТУ, 2005. — 80 с. ISBN 985-479-106-8.
3. Ливотов В.С., Технологические расчёты упругих элементов. Часть I. Поверочные расчёты витых пружин и пружинных колец / В.С. Ливотов, А. С. Просвилов, А. В. Напалков. — ОАО Волгоградский завод тракторных деталей и нормалей, Волгоград, 2002. — 16 с.
4. Адлер Ю.П., Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Макарова, Ю.В. Грановский; АН СССР. Науч. совет по комплексной проблеме «Кибернетика». Секция «Мат. Теория эксперимента». - 2-е изд., перераб. и доп. — Москва.: Наука, 1976. — 279 с.
5. Жальников Е.П., Основы триботехники: учеб. для вузов / Е.П. Жильников, В.Н. Самсонов. - Самара: Изд-во Самар, гос. аэрокосм, ун-та, 2012. - 136 с. ISBN 978-5-7883-0919-4.
6. Пенкин Н.С., Пенкин А.Н., Сербин В.М. П 25 Основы трибологии и триботехники: учеб. пособие. 2 е изд., стереотипн. — М.: Машиностроение, 2012. — 208 с.: ил. ISBN 978-5-94275-583-6.

Research of physical and mechanical parameters of transmission lubricant of hydromechanical gearboxes of buses during operation

Orekhov V.V.^{1,a}

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 4,

St. Petersburg, Russia

^avitalik.orehov95@mail.ru

Keywords: bus, hydromechanical gearbox, transmission lubricant, full factorial experiment, tribological parameter, friction machine, regression method.

This paper examines the physical and mechanical (tribological) characteristics, in particular, the friction coefficient in the fluid friction coupling system, at different service life levels of Valvoline Light & HD ATF-CVT transmission oil used in ZF Ecoliaif 6AP1700B hydromechanical gearboxes of city buses. The studies were conducted using equipment for analyzing the tribological parameters of materials.

A full factorial experiment was carried out on a 2070 SMT-1 friction machine in accordance with a pre-compiled experiment planning matrix. A mathematical-statistical (regression) calculation method was used to process the obtained output data and create a mathematical model describing the response function of the process under study. An empirically confirmed mathematical model has been developed, showing the dependence of the friction coefficient change on the operating time in the friction unit under study of the ZF Ecoliaif 6AP1700B hydromechanical gearbox. A geometric surface of the correlation relationship between the input controlled parameters and the output parameter of the experiment, as well as a reaction surface based on the constructed mathematical model of the tribocoupling system under study are also presented.

УДК 629.4.023.142:624.078.8, 621.791

Оценка жесткостных свойств кузова пассажирского вагона на основе усовершенствованной методики

Лукашова Е.В.^a

Брянский государственный технический университет, бул. 50 лет Октября 7, Брянск, Россия

^a leno4kachepikova@gmail.com

Ключевые слова: кузов пассажирского вагона, несущая конструкция, жесткостные свойства, собственная частота изгибных колебаний

Предложена к рассмотрению усовершенствованная методика оценки вибрационной нагруженности вагона. В качестве способа определения жесткостных свойств кузова, предложен метод математического моделирования. Для определения динамической нагруженности кузова созданная конечноэлементная модель была приведена к четырем вариантам, каждый из которых преобразовывался в пространственную гибридную динамическую модель. Полученные при расчете результаты сравнивались со значениями ходовых испытаний вагона. Анализ данных показал, что четвертый вариант конечноэлементной модели кузова пассажирского вагона, который учитывает реальное распределение массы элементов внутреннего оборудования и интерьера, имеет значения, более приближенные к данным, полученным при ходовых испытаниях. Исходя из этого, можно сделать вывод, что данный вариант больше всего подходит для расчета жесткостных характеристик кузова пассажирского вагона.

Вибрационная нагруженность кузова пассажирского вагона является результатом возмущений, которые возникают в местах контактов колес с рельсами. В связи с тем, что железнодорожный путь имеет неровности, пассажирский вагон при движении испытывает колебания, частота которых зависит от жесткостных характеристик кузова.

Жесткостные характеристики кузова вагона являются одним из основных критериев комфорта и безопасности пассажиров при поездке на железнодорожном транспорте.

Основываясь на изученных подходах оценки жесткостных свойств кузовов пассажирских вагонов, была разработана усовершенствованная методика, которая позволит рассчитать вибрационную нагруженность вагона с учетом внутреннего оборудования и интерьера при помощи математического моделирования.

В настоящее время, оценка вибрационной нагруженности пассажирского вагона, с помощью расчетных конечноэлементных моделей, заключается в определении собственных частот кузова с равномерно распределенной массой брутто по всем его узлам, путем задания измененной плотности материала [1 – 4]. Такое допущение способствует искажению результатов полученных расчетов, хотя и позволяет быстро смоделировать нагружение кузова. В реальности пассажирский вагон имеет: настил пола, расположенного на металлических пружинах, прикрепленных к раме, межкупейные перегородки и тяжелое внутреннее и навесное вагонное оборудование. Эти составляющие обладают весомыми инерциальными характеристиками, которые также оказывают влияние на жесткостные свойства кузова.

В качестве объекта апробации предложенных методик был принят спальный вагон модели 61-4516 производства ОАО «Тверской вагоностроительный завод». Для этого была разработана конечноэлементная модель в программном комплексе, который реализует метод конечных элементов. Первый этап заключался в разработке идеализированной геометрической пространственной модели, с помощью которой формировалась дискретная модель путем встроенных программных алгоритмов.

Созданная конечноэлементная модель демонстрирует собой оболочечную структуру, имеющую подкрепления, встраиваемые по срединной поверхности, на которой обшивка и каркас кузова выполнена трех узловыми и четырех узловыми пластинчатыми составляющими. Расчетная пластинчатая модель имеет 242 тыс. элементов, а число степеней свободы составляет более 900 тыс.

Для верификации, созданной конечноэлементной модели были рассчитаны собственные частоты и формы колебаний с помощью программного комплекса. Полученные данные сравнивались с данными типовых испытаний по определению собственной частоты изгибных колебаний кузова при воздействии на него возмущающей силы от вибромашины. Испытания проводились Испытательным центром ЗАО НО «ТИВ».

Входе испытаний было выявлено значение первой собственной частоты изгибных колебаний кузова в вертикальной плоскости, которое имеет значение равное 10,8 Гц.

Расчет собственных частот и форм колебаний смоделированного кузова был осуществлен с помощью решателя программного комплекса. Для определения собственных частот и форм колебаний необходимо решить уравнение движения, которое имеет специальную редуцированную форму [5]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\}. \quad (1)$$

При отсутствии демпфирования и приложенной нагрузки уравнение движения в матричной форме преобразуется к виду:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0, \quad (2)$$

где $\{\ddot{u}\}$ – вектор ускорения; $\{\dot{u}\}$ – вектор перемещения; $[K]$ – матрица жесткости; $[M]$ – матрица масс. Решение этого уравнения сводится к гармоническим колебаниям с частотой ω :

$$\{u\} = \{\varphi\} \sin \omega t, \quad (3)$$

где $\{\varphi\}$ – собственный вектор или форма колебаний. Данное решение совместимо с уравнением собственных частот:

$$\det([K] - \omega^2 [M]) = 0, \quad (4)$$

где ω – собственная частота колебаний кузова. Корни этого уравнения – это собственные частоты колебаний кузова, равные количеству степеней свободы этой же системы. Если собственные частоты упорядочить, то образуется спектр собственных частот кузова.

Исходя из уравнения (4) можно вычислить собственные формы колебаний:

$$\{u\} = \sum \{\varphi_n\} \cdot q_n = [K]\{q\}, \quad (5)$$

где q_n – n -ая обобщенная координата.

Для нахождения значений собственных частот и форм колебаний кузова рекомендуется использовать метод Ланцоша [5], который сочетает лучшие свойства итерационных методов и методов приведения.

Расчетное значение первой собственной частоты изгибных колебаний кузова в вертикальной плоскости при расчете конечноэлементной модели получилось равным 12,08 Гц, что говорит об адекватности созданной конечно элементной модели, т. к. расхождение с данными при испытании составляет 11,85 %.

Для анализа динамический нагруженности кузова созданную конечноэлементную модель привели к четырем вариантам.

Первый вариант конечноэлементной модели представляет собой оболочечную структуру, которая была описана ранее. Основной особенностью является то, что масса кузова вместе с оборудованием и внутренним интерьером равномерно распределена по всем узлам конечноэлементной модели.

Второй вариант конечноэлементной модели отличается от первого тем, что масса кузова равномерно распределяется по основным элементам несущей конструкции, таким как: рама, боковые и торцовые стены, крыша. На каждый элемент задается масса, соответствующая массе металлоконструкции и оборудования, размещаемого на нем.

В третьем варианте конечноэлементной модели масса кузова распределяется на каждый ответственный элемент металлоконструкции. Масса тяжеловесного оборудования (бак с водой, кондиционер, подвагонное оборудование) вводится объемными конечными элементами, присоединяемыми к модели в узлах, соответствующих точкам крепления данного оборудования в реальной конструкции.

Четвертый вариант конечноэлементной модели представляет собой кузов, в котором все тяжеловесное оборудование смоделировано аналогично третьему варианту. На раму кузова пластинчатыми элементами был смоделирован пол, расположенный на упругих стержневых звеньях (рис. 1). На полу поставлены межкупейные перегородки, смоделированные пластинами, диваны и полки, которые выполнены в виде объемных элементов (рис. 2).

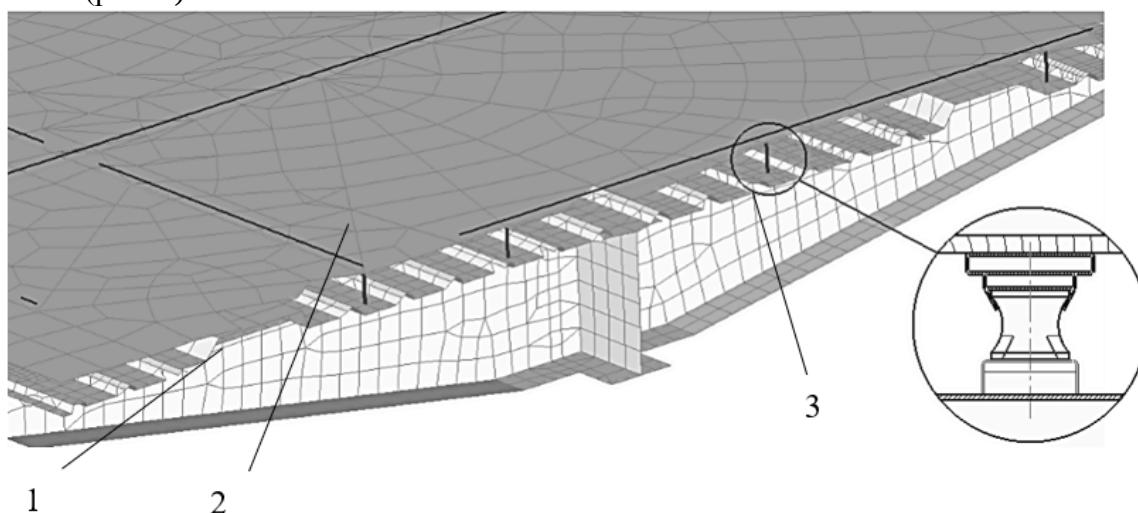


Рис. 1. Смоделированная рама кузова с полом на упругих элементах:

1 – рама конечноэлементной модели кузова с металлическим настилом пола; 2 – пол салона вагона; 3 – упругий элемент

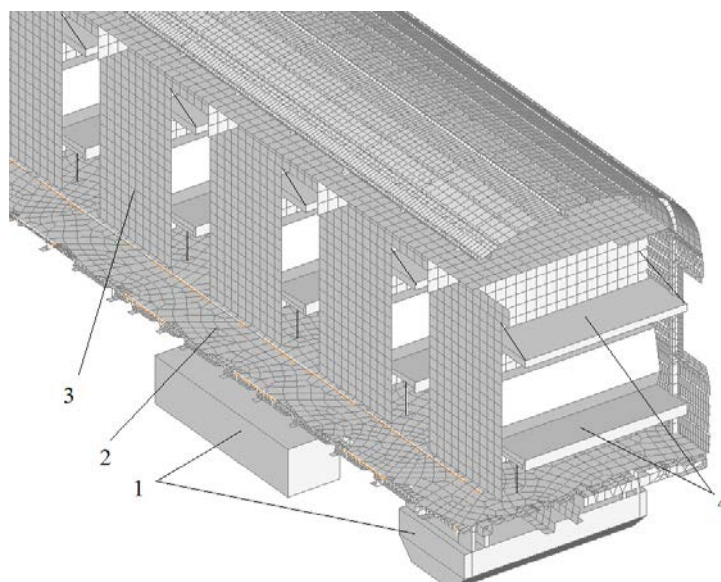


Рис. 2. Четвертый вариант конечноэлементной модели:

1 – тяжеловесное оборудование; 2 – пол на упругих элементах; 3 – межкупейные перегородки; 4 – диваны и полки

В программном комплексе «Универсальный механизм» [6], проводились анализ и оценка динамической нагруженности кузова. Расчет необходимых показателей осуществлялся с использованием пространственных гибридных динамических моделей, выполненных на основе конечноэлементных схем, для каждого из четырех вариантов (рис. 3). Данная модель является совокупностью связанных упругих и абсолютно твердых тел, описывающих колебания вагона в пространстве.

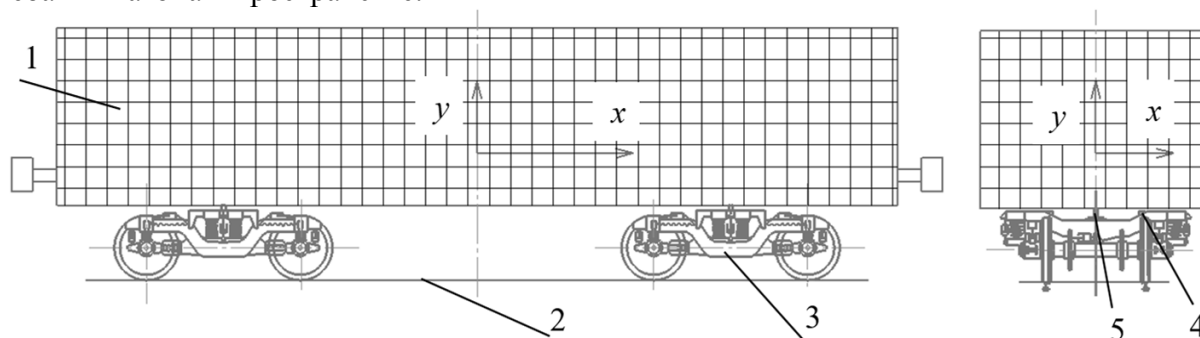


Рис. 3. Структурная схема гибридной динамической модели пассажирского вагона:

1 – кузов; 2 – неровности рельсового пути; 3 – подсистема тележка; 4 – силовой контактный элемент, моделирующий опирание кузова вагона на скользящие; 5 – линейный силовой элемент, моделирующий ограничения горизонтальных перемещений кузова относительно наддрессорного бруса в пятниковом узле

Динамическая нагруженность несущей конструкции кузова вагона исследуется на прямых и кривых участках пути. Данные участки соответствуют частям маршрута Москва – Санкт-Петербург. Диапазон скоростей на данных отрезках пути варьируется от 20 до 160 км/ч с интервалом 20 км/ч. Движение вагона моделировалось с учетом минимальных неровностей рельсовой колеи. В соответствии с РД 32.68-96 [7] указанные неровности формировались на основании функции спектральной плотности эквивалентной расчетной неровности в вертикальном и горизонтальном направлениях. Согласно [8] моделирование прохождения вагоном на рассматриваемой скорости кривых участков пути производится с минимально допустимым значением радиуса кривой.

Выбор рационального варианта конечноэлементной модели осуществлялся путем сравнения полученных результатов, зафиксированных в среднем сечении кузова на уровне пола, в частности спектральной плотности мощности вертикального виброускорения (W) для

различных частот колебаний (f) и скоростей движения (v). Графики зависимости спектральной плотности мощности от частоты колебаний при скоростях движения от 20 км/ч до 140 км/ч приведены на рис. 4.

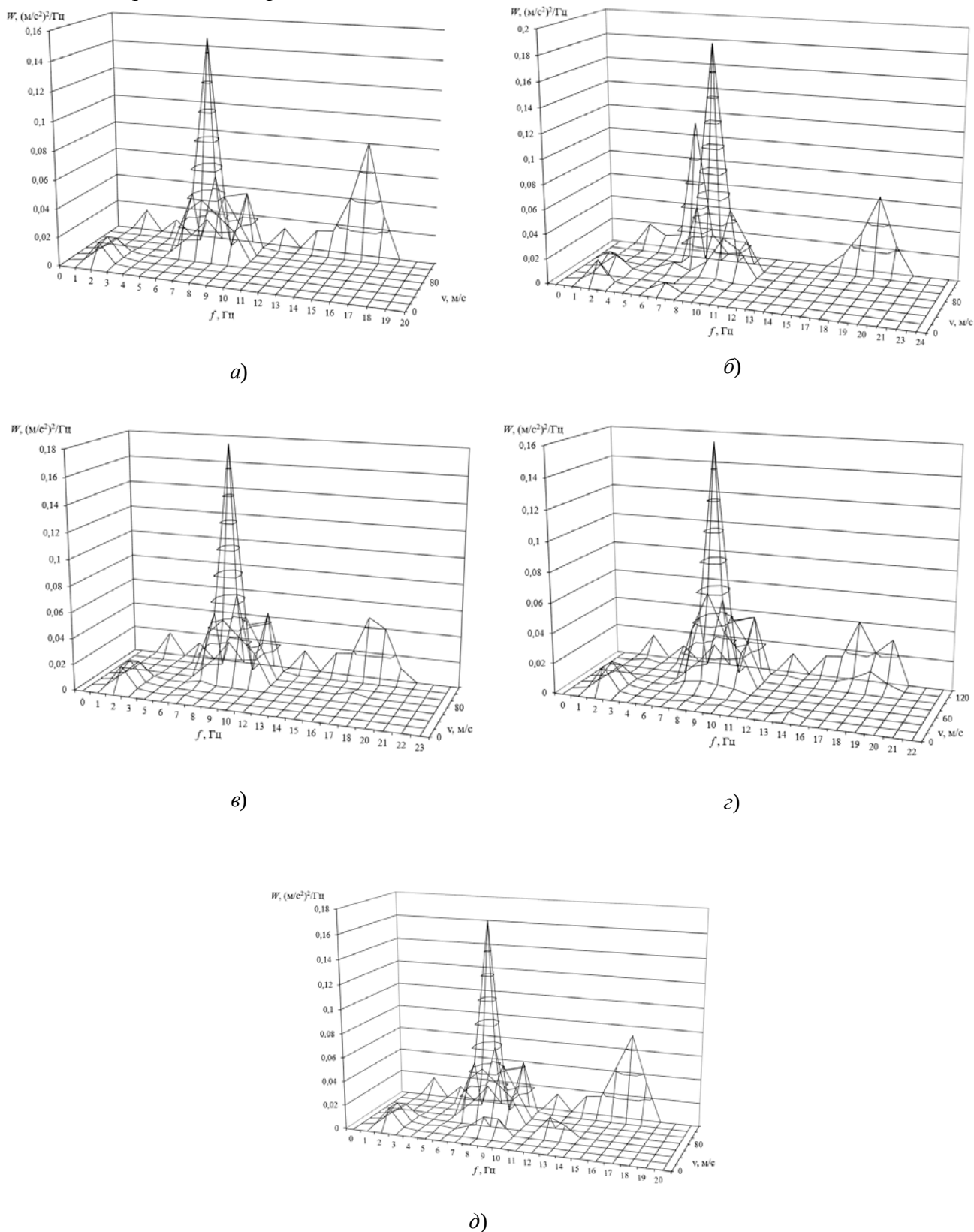


Рис. 4. Зависимости спектральной плотности мощности вертикального виброускорения от частоты колебаний кузова в среднем сечении на уровне пола:
а – экспериментальные значения; б – первый вариант конечноэлементной модели;

в – второй вариант конечноэлементной модели; г – третий вариант конечноэлементной модели; д – четвертый вариант конечноэлементной модели

В ходе сопоставления полученных расчетных данных с натурными ходовыми испытаниями было получено, что:

- первый вид конечноэлементной модели имеет различия приблизительно на 19...20 % по частотам и на 20...24 % по значениям спектральной плотности мощности;
- второй вид конечноэлементной модели имеет различия приблизительно на 14...17 % и 17,5...21 %;
- третий вид конечноэлементной модели имеет различия приблизительно на 10...12 % и 12...16 %;
- четвертый вид конечноэлементной модели имеет различия приблизительно на 7...9 % и 9...11 %.

Проведя анализ полученных данных, был сделан вывод, что четвертый вид конечноэлементной модели имеет результаты, более приближенные к значениям, полученным при испытаниях, что говорит о том, что данный вид конечноэлементной модели более всего подходит для расчета жесткостных характеристик кузова пассажирского вагона.

Литература:

1. Tawade S. (2022). Analysis of Natural Frequency of a Four-Wheeler Passenger Car by Combined Rectilinear and Angular Modes an Analytical Approach. 9. P. 319–324.
2. Sun W., Zhou J., Gong D., You T. Analysis of modal frequency optimization of railway vehicle car body. *Advances in Mechanical Engineering*. 2016; 8(4). doi:10.1177/1687814016643640
3. Sun, Wenjing & Zhou, Jinsong & Gong, Dao & You, Taiwan. (2016). Analysis of modal frequency optimization of railway vehicle car body. *Advances in Mechanical Engineering*. 8. 10.1177/1687814016643640.
4. Skachkov A. N., Samoshkin S. L., Korshunov S. D., Kobishchanov V. V., Antipin D. Ya. General principles of control method of passenger car bodies bending vibration parameters. To cite this article: A. N. Skachkov et al 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 327 022005
5. Гончаров П.С. NX Advanced Simulation. Практическое пособие. М.: МДК Пресс, 2014. 112 с.
6. Погорелов Д.Ю. Введение в моделирование динамики систем тел: монография. Брянск: БГТУ, 1997. 156 с.
7. РД 32.68-96 «Расчетные неровности железнодорожного пути для использования при исследованиях и проектировании пассажирских и грузовых вагонов. М.: ВНИИЖТ, 1997. 20 с.
8. Изыскания и проектирование железных дорог: учебник для вузов ж-д. Транспорта / А.В. Горинев, И.И. Кантор, А.П. Кондратченко, И.В. Турбин – 6-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1979. Т. 1. 319 с.
9. Carlbom P. Carbody and Passengers in Rail Vehicle Dynamics: doctoral thesis. Stockholm, 2000. 107 p.
10. Takahiro T., Tadao T. Reduction of bending vibration in railway vehicle carbody using carbody–bogie dynamic interaction // *Selected and Extended Papers from the 21st Symposium of the International Association for Vehicle System Dynamics / 21st Symposium of the International Association for Vehicle System Dynamics (IAVSD '09)*. Stockholm, Sweden, 2010. P. 467–487.
11. Dumitriu M. Ride comfort enhancement in railway vehicle by the reduction of the car body structural flexural vibration // *MedTech International Conference – Modern Technologies in Industrial Engineering*. Sibiu, Romania, 2017. P. 1–12.

Assessment of the rigidity properties of the passenger car body based on an improved methodology

Lukashova E.V.^a

Bryansk State Technical University, 7, 50 Let Oktyabrya Blvd, Bryansk, Russia

^a leno4kachepikova@gmail.com

Keywords: passenger car body, load-bearing structure, stiffness properties, natural frequency of bending vibrations

An improved method for estimating the vibration load of a wagon is proposed for consideration. A method of mathematical modeling is proposed as a way to determine the body weight properties. To determine the dynamic load of the body, the created finite element model was reduced to four variants, each of which was transformed into a spatial hybrid dynamic model. The results obtained during the calculation were compared with the values of the sea trials of the wagon. Data analysis has shown that the fourth variant of the finite element model of the passenger car body, which takes into account the actual weight distribution of the elements of the interior equipment and interior, has values closer to the data obtained during sea trials. Based on this, it can be concluded that this option is most suitable for calculating the stiffness characteristics of the passenger car body.

УДК 534.1

Алгоритм решения системы уравнений, описывающих колебания безрессорной подвески с возможностью отрыва шины от опорной поверхности дороги

Рыков С.П.^{1,a}, Тобоков Р.В.^{2,b}

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^arsp7-8-48@rambler.ru, ^btobokov@bk.ru

Ключевые слова: безрессорная подвеска, колебания, динамика, параметры колебательной системы, радиальная жесткость, автомобилестроение.

В статье представлен алгоритм решения системы уравнений, описывающих колебания безрессорной подвески с возможностью отрыва шины от дорожной поверхности. Исследование акцентирует внимание на взаимодействии шины и дороги, что критически важно для безопасности и комфорта транспортных средств, особенно специализированных, таких как тракторы и строительные машины. Алгоритм учитывает параметры колебательной системы, такие как масса, радиальная жесткость шины и поглощающая способность, позволяя анализировать динамику колебаний в условиях неровной дороги. В результате проведенных вычислений выявлено влияние различных факторов на устойчивость и поведение транспортных средств, что открывает новые возможности для оптимизации конструкций подвесок и шин. Полученные результаты подтверждают теоретические предположения о системах безрессорной подвески и создают основу для дальнейших исследований в области автомобилестроения. Статья подчеркивает важность глубокого понимания динамических процессов для повышения безопасности и комфорта передвижения.

Колебательные системы, возникающие в транспортных средствах, являются предметом тщательных исследований, поскольку они влияют на безопасность, комфорт и устойчивость автомобилей на дороге. В контексте безрессорной подвески, которая часто используется в специализированных транспортных средствах, таких как колесные тракторы или строительные машины, особое внимание уделяется взаимодействию между шиной и дорожным покрытием. Данная работа посвящена разработке алгоритма для анализа

колебаний безрессорной подвески автомобиля, особенно в условиях, когда шина может временно отрываться от опорной поверхности.

Важным аспектом исследования является влияние различных параметров колебательной системы, таких как масса, радиальная жёсткость шины и поглощающая способность, на динамику колебаний. Понимание этих процессов не только помогает предсказать поведение транспортных средств, при движении по неровной дороге, но и может быть использовано для оптимизации конструкций подвесок и улучшения характеристик шин.

В рамках данного алгоритма предлагается учитывать множество факторов: от геометрических характеристик неровностей дороги до параметров, влияющих на жесткость и поглощение колебаний шины. Основными целями исследования являются: определение условий, приводящих к отрыву колеса от дороги, анализ продолжительности этих отрывов, а также влияние различных параметров на устойчивость движения.

Таким образом, актуальность исследования обусловлена необходимостью глубокого понимания динамических процессов, происходящих в безрессорной подвеске, что в свою очередь может способствовать повышению безопасности и комфорта автомобиля, а также расширению возможностей применения безрессорных технологий в различных областях.

Произведем ввод параметров колебательной системы, эквивалентной безрессорной подвеске автомобиля:

M – масса, опирающаяся на шину;

$C_{ш}$ – радиальная жесткость шины,

$H_{ш}, n$ – постоянные поглощающей способности шины;

$f_{ш}$ – текущее значение радиальной деформации;

$f_{ш\max}$ – наибольшее значение деформации в полном цикле испытаний «нагрузка – разгрузка» или амплитудное значение деформации при вынужденных колебаниях;

$f_{шт}$ – прогиб шины при статической нагрузке, равной номинальному значению.

Выполним вычисление собственной частоты колебательной системы ω и приведенной постоянной поглощения $R_{ш}$:

$$\omega = \sqrt{\frac{C_{ш}}{M}}, \quad (1)$$

$$R_{ш} = \sqrt{\frac{H_{ш}}{M}}. \quad (2)$$

Введем параметры неровностей дороги (амплитуды q_0 и длины l_n) и выполним организацию цикла по частоте вынужденных колебаний системы p . Частота p изменяется от 1 до 60 1/с с шагом $\Delta p = 1\text{с}^{-1}$. Скорость движения вдоль дороги и частота вынужденных колебаний связаны соотношением:

$$U_a = \frac{p \cdot l_n}{2\pi}. \quad (3)$$

Вычисление амплитуды $f_{шва}$ и начальной фазы φ вынужденных колебаний системы при движении по неровной дороге синусоидального профиля ведется по соотношениям:

$$f_{шва} = \frac{q_0}{\sqrt{(1 - \frac{\omega^2}{p^2})^2 + \frac{R_{ш}^2}{p^4} \cdot f_{шва}^{2(n-1)}}}, \quad (4)$$

$$\varphi = \arctg \frac{p^2 - \omega^2}{R_{ш} \cdot f_{шва}^{2(n-1)}}. \quad (5)$$

Для определения $f_{шва}$ по уравнению (4) применяется метод итерации. Достаточное условие сходимости итеративности цикла для уравнения (4) выполняется, т.к.

$$\left| \frac{d\tau_1(f_{шва})}{df_{шва}} \right| < 1, \quad (6)$$

где $\tau_1(f_{шва}) = H_{ш} \cdot f_{ш\max}^n$.

Вычисления $f_{шва}$ ведутся с точностью до $1/10^4$.

Вычислим постоянную интегрирования C и начальную фазу ψ свободных затухающих колебаний системы. Начальные условия для определения C и ψ при въезде на неровную дорогу имеют вид:

$$\text{при } t = 0 \quad \begin{cases} f_{\text{ш}}(t) = 0, \\ \dot{f}_{\text{ш}}(t) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

После приземления колеса на неровную дорогу начальные условия для определения C и ψ имеют вид:

$$\text{при } t = T_k \quad \begin{cases} f_{\text{ш}}(t) = -f_{\text{шст}}, \\ \dot{f}_{\text{ш}}(t) = \dot{\xi}(t) - q(t). \end{cases} \quad (8)$$

В общем случае выражения для определения C и ψ записываются в виде:

$$C = \sqrt{\left(\left[\frac{R_{\text{ш}}}{2\omega^2 \cdot C} (f_{\text{шст}} - f_{\text{шва}} \cdot \sin \varphi) - \frac{p \cdot f_{\text{шва}}}{\omega} \cdot \cos \varphi + B\right]^2 + (f_{\text{шст}} - f_{\text{шва}} \cdot \sin \varphi)^2\right)^{1-n}}, \quad (9)$$

$$\psi = \arcsin\left(-\frac{f_{\text{шст}} - f_{\text{шва}} \cdot \sin \varphi}{1 - n \sqrt{C}}\right), \quad (10)$$

где $B = \frac{1}{\omega} [\dot{\xi}_{oi} - g(T_{ki} - T_{oi}) - q_0 \cdot p \cdot \sin p \cdot (T_{ki} + T)]$.

В случае начальных условий вида (7) параметры B и $f_{\text{шст}}$ в уравнениях (9) и (10) исключаются.

Для определения постоянной интегрирования C по уравнению (9) применяется метод итерации. Достаточное условие сходимости итеративного цикла для уравнения (9) выполняется, т.к.

$$\left| \frac{d\tau_2(C)}{dC} \right| < 1, \quad (11)$$

где $\tau_2(C)$ – правая часть уравнения (9).

Вычисления C ведутся с точностью $1/10^4$.

Выполним организацию цикла по времени движения колебательной системы вдоль дороги t , начиная с въезда на неровности дороги и заканчивая цикл, либо при затухании свободных колебаний подвески, либо после пяти режимов движения «колебание-отрыв-приземление», когда они приобретают нарастающий ими установившийся характер.

Шаг изменения времени движения системы принимается равным одной десятой от периода одной неровности, т.е.

$$\Delta t = \frac{1}{10} \cdot \frac{2\pi}{p}. \quad (12)$$

Произведем проверку первого условия окончания цикла по времени движения. Если выполняется условие

$$C - (1 - n) \frac{R_{\text{ш}}}{2\omega} t \leq 0, \quad (13)$$

то свободные колебания полностью затухают и подвеска в дальнейшем движется вдоль дороги, колеблясь с частотой вынужденных колебаний без потери контакта шины с дорогой.

Частота p увеличивается на один шаг и управление передается позиции 4 (Рис. 1) для организации нового цикла по p .

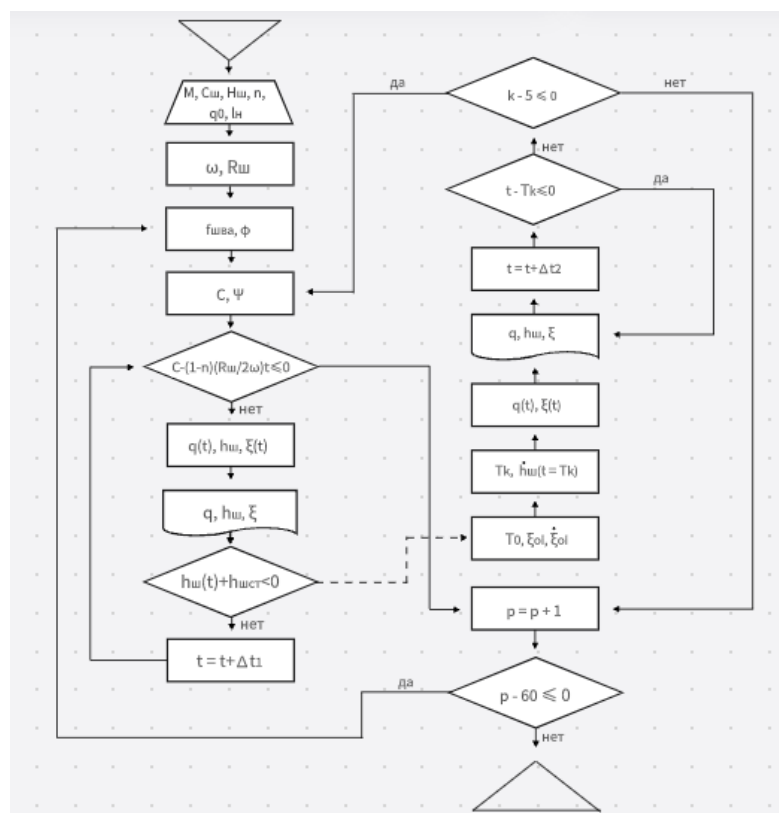


Рис. 1. Блок-схема программы численного решения уравнений движения колебательной системы эквивалентной безрессорной подвеске ЭЦВМ.

Если выполняется условие

$$C - (1 - n) \frac{R_u}{2\omega} t > 0, \quad (14)$$

то ведется вычисление траекторий движения оси колеса $\xi(t)$, неровной дороги синусоидального профиля $q(t)$ и прогиба шины $f_u(t)$.

Вычисление траекторий осуществляется по выражениям вида:

$$f_u(t) = \sqrt[1-n]{C - (1 - n) \frac{R_u}{2\omega} t} \cdot \sin(\omega t - \psi) + f_{uва} \cdot \sin(pt - \varphi), \quad (15)$$

$$q(t) = q_0(1 - \cos pt), \quad (16)$$

$$\xi(t) = q(t) + f_u(t). \quad (17)$$

до тех, пор пока не выполнится условие (13), или пока шина не потеряет контакт с дорогой.

Выполним проверку условия потери контакта шины с неровностями дороги.

Если $f_u(t) + f_{ucr} < 0$, то колебательная система, эквивалентная безрессорной подвеске, начинает двигаться вдоль дороги не касаясь ее неровностей.

Уравнение, описывающее траекторию движения оси колеса имеет вид:

$$\xi(t) = \xi_{00} + \dot{\xi}_{00}(t - T_0) - \frac{g(t - T_0)^2}{2}. \quad (18)$$

Выполним вычисление момента отрыва системы от поверхности дороги T_0 .

Для того, чтобы можно было вычислять траекторию движения оси колеса по уравнению (18) необходимо знать момент отрыва шины от дороги и значения $\xi(t)$ и $\dot{\xi}(t)$ в этот же момент.

Вычисление T_0 ведется методом последовательных приближений. Определяется прогиб шины $f_u(t)$ по уравнению (15) и сравнивается с её прогибом при номинальной нагрузке.

Если выполняется условие

$$(f_u(t) + f_{ucm}) \leq -5 \cdot 10^4, \quad (19)$$

то процесс определения $f_u(t)$ повторяется, но уже при меньшем шаге Δt . Процесс приближений повторяется до тех пор, пока не обеспечится выполнение условия

$$(f_u(t) + f_{ucm}) \leq 1 \cdot 10^4. \quad (20)$$

В этом случае значение времени t и будет соответствовать моменту отрыва. Вычисления значений траектории движения оси колеса и её производной в момент отрыва шины от дороги ведутся по выражению (16) и выражению вида:

$$\begin{aligned} \xi(t) = & q_0 \cdot p \cdot \sin pt + \omega^{1-n} \sqrt{C - (1-n) \frac{R_u}{2\omega} t} \cdot \cos(\omega t - \psi) - \frac{R_u}{2\omega} \cdot \\ & \cdot \sqrt{1-n} \sqrt{[C - (1-n) \frac{R_u}{2\omega} t]^n} \cdot \sin(\omega t - \psi) + \frac{q_0 \cdot p}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{p^2}\right)^2 + \frac{R_u^2}{p^4} f_{ucm}^{2(n-1)}}} \cdot \cos(pt - \varphi). \end{aligned} \quad (21)$$

Вычисления и печать траекторий движения оси колеса, неровностей дороги и прогиба шины при потере контакта системы с дорогой ведутся по выражениям (17), (18) и выражению вида:

$$f_u(t) = -f_{ucm}. \quad (22)$$

Вычисление момента "приземления" системы Момент контакта T_k определяется из уравнения (17) путем приравнивания текущего времени моменту T_k т.е.

$$t = T_k. \quad (23)$$

С учетом этого, выражение для T_k имеет вид:

$$T_k = \frac{T_k^2 - K \cdot \cos p \cdot T_k + L}{2M}, \quad (24)$$

где K, L, M – постоянные коэффициенты, определяемые начальными условиями отрыва шины от дороги.

Вычисление значения T_k ведется по уравнению (24) методом Ньютона-Равсона. Если перенести T_k в правую часть уравнения (24), то для определения каждого последующего притяжения используется зависимость вида:

$$T_{ki+1} = T_{ki} + \frac{\tau_3(T_k)}{d\tau_3(T_k)/dT_k}, \quad (25)$$

где $\tau_3(T_k)$ – правая часть уравнения (24).

Вычисления ведутся с точностью до 1/10 части.

Вычисление начальных условий (8) ведутся по выражению вида:

$$\dot{f}_u(T_k) = \dot{\xi}(T_k) - \dot{q}(T_k) = \dot{\xi}_{00} - g(T_k - T_0) - q_0 \cdot p \cdot \sin p \cdot T_k, \quad (26)$$

После этого управление вычислениями передается позиции 5 для вычисления значений C и φ следующего режима движения «колебание-отрыв-приземление».

Выполним проверку второго условия прекращения цикла по времени движения. Если режим движения системы с потерей контакта шины с дорогой носит нарастающий или установившийся характер, то при количестве полных циклов «колебание-отрыв-приземление» равном 5, цикл по времени движения прекращается. При этом частота p увеличивается на шаг и управление передается позиции 4.

Процесс вычисления прекращается, если частота вынужденных колебаний системы p превысит значение 60 1/с.

После этого необходимо изменить значения параметров колебательной системы или неровностей дороги и повторить программу вычислений заново.

Из изложенного видно, что задача о колебаниях массы, опирающейся на эластичную шину, при движении по неровной дороге с возможностью потери контакта с опорной поверхностью решается в конечном виде. Алгоритм вычисления траектории оси колеса позволяет составить программу расчета колебаний.

В результате проведенного исследования и разработки алгоритма решения системы уравнений, описывающих колебания безрессорной подвески с возможностью отрыва шины от дорожной поверхности, была достигнута важная цель — моделирование поведения транспортного средства в различных условиях. Алгоритм позволяет учитывать ключевые параметры колебательной системы, такие как масса, радиальная жесткость шины и поглощающая способность, что способствует более точному анализу динамики и устойчивости транспортных средств на неровной дороге.

Проведенные вычисления демонстрируют, как изменения физических параметров, таких как амплитуды и частоты колебаний, влияют на взаимодействие шины с дорожным покрытием и на возможность временного отрыва колеса от дороги. Это, в свою очередь, открывает новые горизонты для улучшения конструкций подвески, шин и систем управления автомобилем, что может существенно повысить безопасность и комфорт передвижения.

Кроме того, разработанный алгоритм позволяет провести аналитические исследования характеристик колебательной системы, определить оптимальные условия для максимизации контакта колеса с дорогой и минимизации колебаний, что особенно актуально для специализированных транспортных средств, использующих безрессорные подвески.

Тем самым, полученные результаты не только подтверждают теоретические предположения о поведении систем безрессорной подвески, но и создают практическую основу для дальнейших исследований и разработок в области автомобилестроения и транспортной механики.

Литература:

1. Марголис С.Я. К вопросу оценки стабильности контакта колес с дорогой / Автомобильная промышленность, - 1976, - № II. -С.12-13.
2. Яценко Н.Н. Поглощающая и сглаживающая способность шин, - М.: Машиностроение, 1978, - 132 с.
3. Яценко Н.Н., Рыков С.П., Кананадзе Г.Н. Колебания подвески с учетом поглощающей способности шин XX // Автомобильная промышленность, - 1977, - № 6. - с.15-18.
4. Кравец, В.Н. Теория автомобиля: учебник / В.Н. Кравец; Нижегородский государственный технический университет, Р.Е. Алексеева. – 2-е изд., переработ. – Нижний Новгород, 2013 – 413 с.
5. Бартош В.С., Лаврентьев М.М. Динамическая модель автомобиля в реальном времени. // Автотестирование. - 2000, № 4.- с. 108-115.

The algorithm for solving the system of equations describing the vibrations of a non-suspended suspension with the possibility of tire detachment from the road surface

Rykov S.P.^{1,a}, Tobokov R.V.^{1,b}

¹Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

^arsp7-8-48@rambler.ru, ^btobokov@bk.ru

Keywords: non-suspended suspension, vibrations, dynamics, parameters of the oscillatory system, radial stiffness, automotive engineering.

The article presents an algorithm for solving a system of equations that describes the vibrations of a non-suspended suspension with the possibility of tire detachment from the road surface. The study emphasizes the interaction between the tire and the road, which is critically important for the safety and comfort of vehicles, especially specialized ones such as tractors and construction machinery. The algorithm takes into account the parameters of the oscillatory system, such as mass, radial stiffness of the tire, and damping capacity, allowing for the analysis of vibration dynamics under uneven road conditions. As a result of the computations, the influence of

various factors on the stability and behavior of vehicles has been identified, opening new opportunities for optimizing suspension and tire designs. The results confirm theoretical assumptions about non-suspended suspension systems and provide a foundation for further research in the field of automotive engineering. The article highlights the importance of a deep understanding of dynamic processes to enhance safety and comfort in transportation.

***МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ,
ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ
МАШИН И МЕХАНИЗМОВ***

Совершенствование конструкции вторичных уплотнений в разгруженных соединениях

Белоголов Ю.И.^а

Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, г. Иркутск, Россия

^аbelogolov_yi@irgups.ru

Ключевые слова: уплотнительное соединение, оболочка, напряженно-деформированное состояние, APM WinMachine.

В настоящее время совершенствование уплотнительных соединений направлено на создание конструкций затворов, герметичность которых обеспечивается при сравнительно малых значениях контактного давления в стыке «золотник» - «седло». К таким конструкциям относятся, например, уплотнения с упругой кромкой. В следствии малых значений усилия герметизации, приобретают достаточно важное значение внешние силовые факторы (давление рабочей среды), влияющие на значение контактного давления в уплотнительном стыке. Одним из способов компенсации оказываемого воздействия рабочей среды на «золотник» является его «разгрузка». Использование «разгруженного» золотника позволяет обеспечить необходимое значение герметизирующего усилия в уплотнительном стыке соединения, не перегружая тонкостенное «седло». Изменения, вносимые в конструкцию затвора в большинстве случаев, приводят к появлению «вторичных» уплотнений, герметичность которых необходимо обеспечивать. С этой целью в научной статье рассматриваются вопросы обеспечения герметичности вторичных уплотнений клапанных соединений. Производится моделирование и расчет в APM WinMachine и предлагаются варианты совершенствования конструкции таких уплотнений.

Введение.

В арматуростроении существует направление, связанное с компенсацией давления рабочей среды на «золотник» затвора подъемных клапанов. Полная, либо частичная компенсация указанного давления позволяет достичь постоянства усилия в зоне контакта «золотника» с «седлом» и обеспечить герметичность соединения без его перегрузки [1, 2]. Это особенно актуально для тонкостенных уплотнений типа «упругая кромка» [3, 4], которые чувствительны к условиям силового нагружения [5]. Частичная компенсация давления может быть использована с целью самоуплотнения соединения в случае направления рабочей среды на «золотник».

Разгруженные уплотнительные соединения.

В [6–8] показано, что «разгрузка» уплотнительного соединения позволяет компенсировать перепады давления рабочей среды на «золотнике», исключить колебание скорости при перекрытии потока, при этом могут возрастать масса-габаритные параметры соединения, что компенсируется меньшей массой привода. В настоящее время «разгрузка» затвора является перспективным направлением совершенствования трубопроводной арматуры, не только как эффективный способ повышения ресурса работы уплотнительного соединения, но и с экономической стороны, позволяя применять маломощные приводы.

К одному из основных недостатков «разгруженных» соединений можно отнести наличие дополнительных контактных (уплотнительных) поверхностей (рис. 1), герметичность которых необходимо обеспечивать. В зависимости от конструкции разгружающего элемента количество таких поверхностей может быть различным.

Требуемое усилие со стороны привода $F_{пр}$ может быть определено из выражения:

$$F_{\text{пр}} = q_{\text{гер}} \cdot \pi \cdot DN + \frac{\pi \cdot (D_{\text{н}} - D_{\text{р}})^2}{4} \cdot p_{\text{р}} + F_{\text{тр}}.$$

Например, для рис. 1, возможны три варианта «разгрузки» соединения:

- $D_{\text{р}} < D_{\text{н}}$ – частичная «разгрузка» (использование дожимной силы среды);
- $D_{\text{р}} = D_{\text{н}}$ – полная «разгрузка» (оптимальное усилие со стороны привода);
- $D_{\text{р}} > D_{\text{н}}$ – полная «разгрузка» с запасом (большие перепады давления).

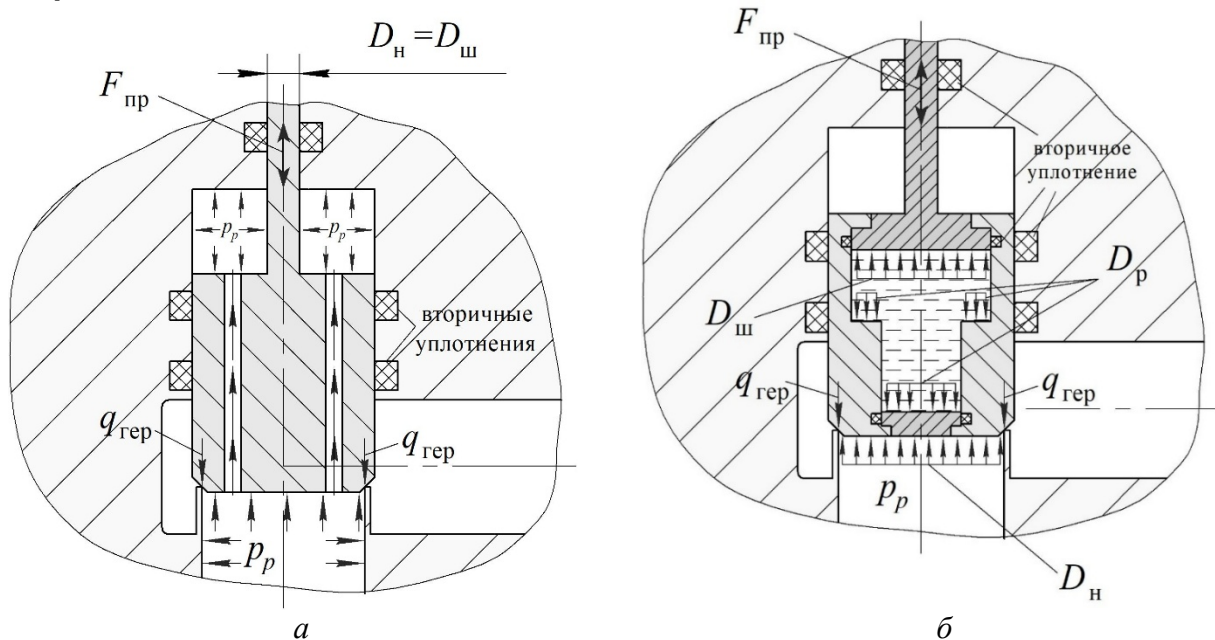


Рис. 1. Разгруженный клапан

а – жесткая связь «золотника» со штоком; *б* – без жесткой связи «золотника» со штоком

$F_{\text{пр}}$ – усилие привода; $q_{\text{гер}}$ – герметизирующая сила; $D_{\text{р}}$ – диаметр «разгрузки»;

$D_{\text{н}}$ – неразгруженный диаметр; $p_{\text{р}}$ – давление рабочей среды

Опорные элементы вторичных уплотнений

В зависимости от вида среды применяют различные полимерные уплотняющие материалы, выполненные в виде колец различного профиля, расположенных непосредственно в затворе, либо запрессованные в корпусе клапана.

Повреждение таких уплотнений наступает в результате повышения температуры, износа и выдавливания в зазор между подвижными элементами клапана (рис. 2).

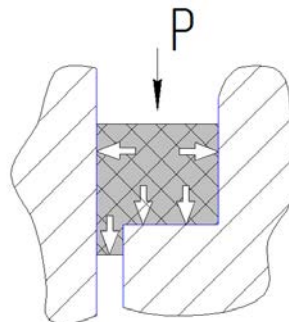


Рис. 2. Распределение сил во вторичном уплотнение

Установка дополнительных элементов (рис. 3) из термопластичных материалов (фторопласт и др.) снижает износ и температурное влияние, а также создает опорную поверхность и препятствует выдавливанию эластичного уплотнения в зазор.

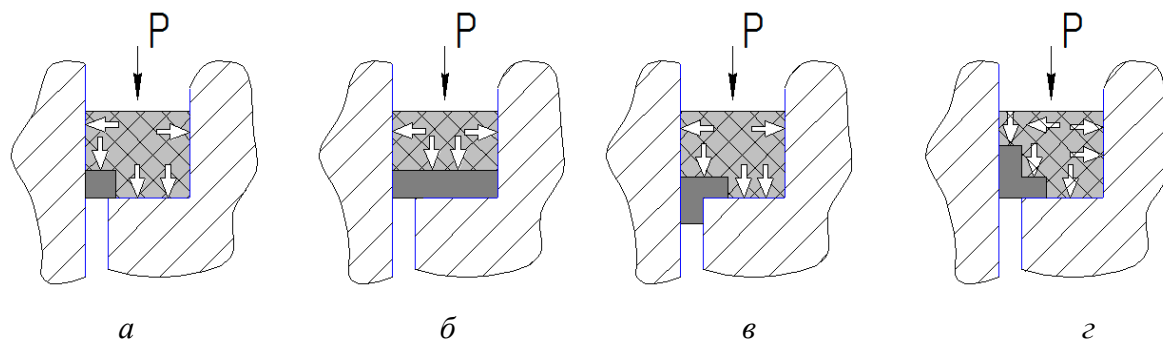


Рис. 3. Распределение сил во вторичном уплотнении с опорными элементами

Давление, создаваемое на поверхность эластичного материала, ограничено величиной зазора между деталями. При повышении давления вторичное уплотнение начинает выдавливаться в зазор (рис. 4) между подвижными деталями, что ведет к его повреждению.

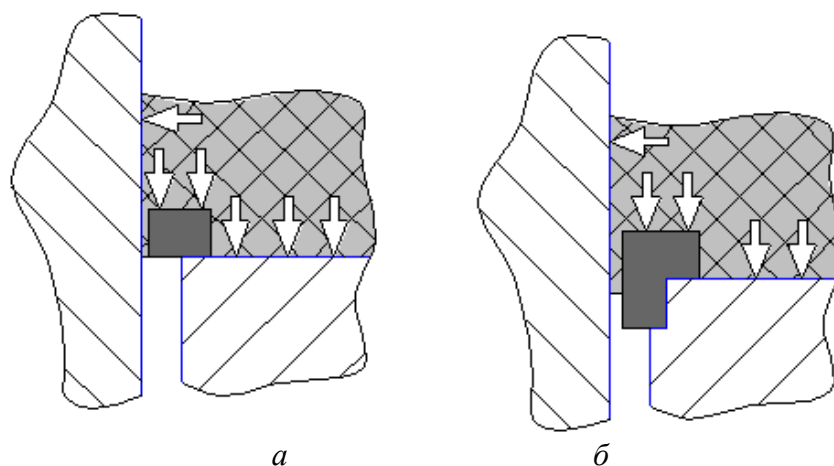


Рис. 4. Выдавливание эластичного материала в зазор

Основными недостатками использования опорных элементов (рис. 3) в конструкциях вторичных уплотнений являются следующие:

1. Износ уплотняемых поверхностей ведет к увеличению зазора между ними, что снижает эффективность использования таких конструкций уплотнения.
2. Износ самих опорных элементов, ведет к появлению зазора.
3. Степень прижатия опорных элементов зачастую недостаточна для герметизации соединения.
4. Конструктивные неточности, связанные с радиальным смещением уплотняемых деталей.
5. Попадание абразивных частиц при радиальном смещении в зону контакта уплотнения (опорных элементов) с корпусом снижает герметичность.

С повышением давления и температуры, надежность таких соединений падает, и увеличиваются утечки рабочей жидкости.

Результаты и обсуждения.

Проведем эксперимент. Если создать давление на эластичный материал (например силикон) в замкнутом пространстве, он деформируется, заполняя свободное пространство между деталями (рис. 5).

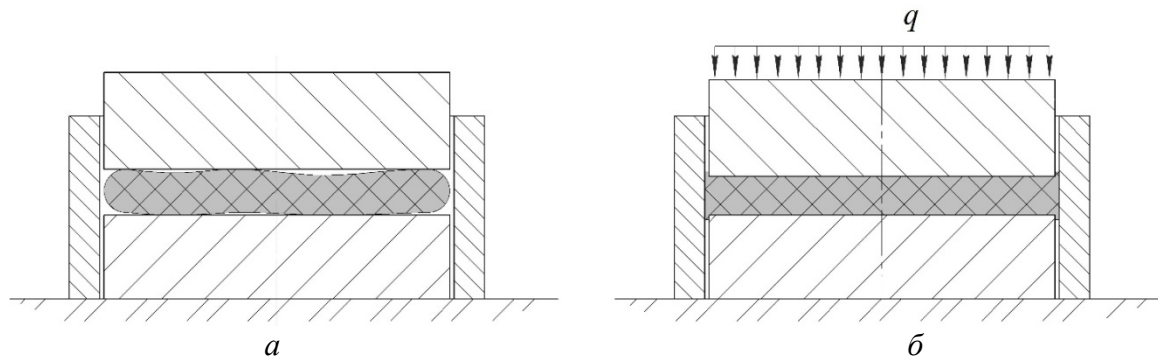


Рис. 5. Эластичный материал

a – эластичный материал без нагрузки; b – эластичный материал под нагрузкой

Моделирование в САЕ-системе автоматизированного расчета и проектирования APM WinMachine показало, что если нагрузить эластичный материал (рис. 6), который не содержит никаких опорных элементов, с зазором между уплотняемыми деталями 0,01 мм, то его повреждение наступает непосредственно в результате выдавливания материала в зазор на величину δ (без учета внешних факторов и динамики нагружения) уже при 14 кН.

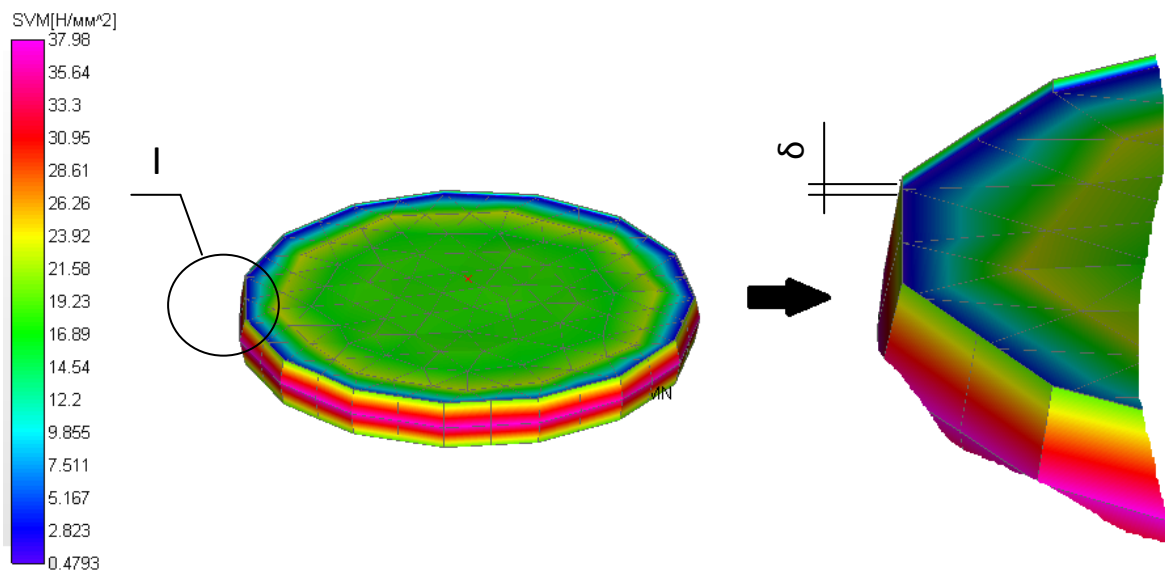


Рис. 6. Эластичный материал без опорных элементов

Повышение надежности уплотнения, конструктивно может быть выполнено различными способами, один из которых заключается в замене опорных элементов выпукло-вогнутыми элементами (рис. 7).

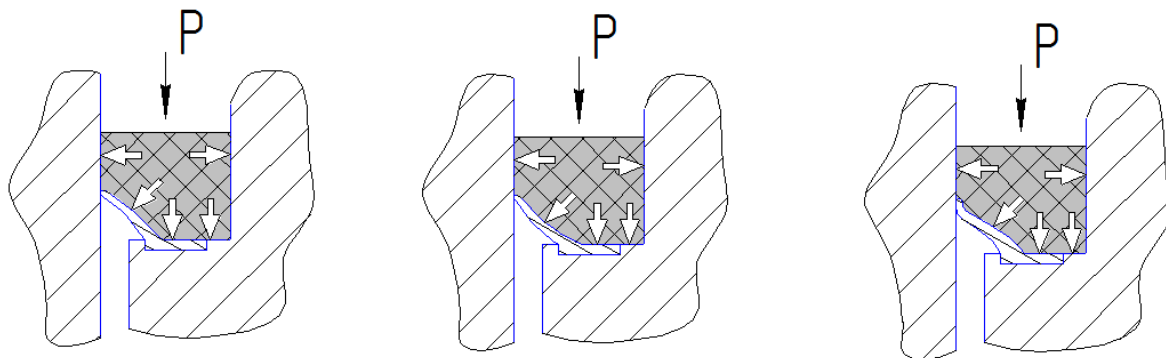


Рис. 7. Варианты выполнения опорных элементов

Установку выпукло-вогнутых дисков в корпус, следует выполнять с предварительным натягом, чтобы обеспечить первоначальный уровень прижатия к корпусу.

Выводы.

Давление, создаваемое на поверхность опорного диска, радиально смещает его относительно корпуса, осуществляя плотное прилегание герметизирующих поверхностей, при этом удаляются возможные посторонние частицы из области контакта и, по сути, осуществляется притирка уплотнительных поверхностей после каждого цикла нагружения.

Литература:

1. Белоголов Ю.И. Совершенствование конструкций уплотнительных соединений с тонкостенными элементами (упругой кромкой): дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2013. 178 с.
2. Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Оболочка как элемент уплотнения // Трубопроводная арматура и оборудование. 2014. № 2. 94-97.
3. Долотов А.М., Гозбенко В.Е., Белоголов Ю.И. Уплотнительные соединения с использованием тонкостенных элементов. Деп. рукопись 22.11.2011, № 508-В2011.
4. Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Совершенствование конструкции клапана с тонкостенным уплотнительным элементом // Безопасность регионов - основа устойчивого развития: Третья междунар. науч.-практ. конф. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2012. 243 с.
5. Белоголов Ю.И. Использование осевых упоров и полимерных гасителей динамических нагрузок в затворах с тонкостенными уплотнениями // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2023. - № 3 (79). - С. 34-42.
6. Белоголов Ю.И. Компенсация действия давления рабочей среды в уплотнительных соединениях с тонкостенными элементами // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2021. - №2(70). - С. 51-60.
7. Белоголов Ю.И. Компенсация усилий, действующих на затвор со стороны герметизируемой среды // Проблемы транспорта Восточной Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. Иркутск: ИрГУПС, 2012. С. 124-128.
8. Долотов А.М., Белоголов Ю.И. Обзор способов разгрузки золотника клапана от давления герметизируемой среды // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 3 (7). С. 30-36.

Improving the design of secondary seals in unloaded joints

Belogolov Yu.I.^a

Irkutsk State Transport University, st. Chernyshevsky 15, Irkutsk, Russia

^abelogolov_yi@irgups.ru

Keywords: sealing joint, shell, stress-strain state, APM WinMachine.

Abstract. At present, the improvement of sealing joints is aimed at creating designs of valves, the tightness of which is ensured at relatively low values of contact pressure in the joint "spool" - "seat". Such designs include, for example, seals with an elastic edge. Due to low values of the sealing force, external force factors (pressure of the working medium) that affect the value of the contact pressure in the sealing joint acquire a rather important significance. One of the ways to compensate for the effect of the working medium on the "spool" is its "unloading". The use of an "unloaded" spool allows for the required value of the sealing force in the sealing joint of the connection without overloading the "seat". For this purpose, the scientific article considers the issues of ensuring the reliability and tightness of secondary seals of valve joints. Modeling and calculations are performed in APM WinMachine and options for improving the design of secondary seals are proposed.

Влияние геометрических параметров прямозубых передач на долговечность

Попов А.М.^{1,a}, Мехдиев Р.В.О.^{1,b}

¹Кемеровский государственный университет, бульвар Строителей 47, г.Кемерово.

^bmehdiev23@mail.ru

Ключевые слова: прямозубые передачи, геометрические параметры, износостойкость, износ, оптимизация передач.

Современные зубные передачи широко используются в механических устройствах благодаря своей простоте, высокой эффективности и удобству производства. Однако их применение и долговечность зависят от геометрических параметров, таких как модуль, количество зубьев и ширина венца. Эти характеристики способствуют снижению износа и увеличению нагрузки в процессе эксплуатации. В статье влияние изменения величины износа прямозубых передач, а также методы повышения их износостойкости. Одним из таких методов является регулирование модуля и числа зубьев при неизменном диаметре колеса, что приводит к удельному скольжению и повышению КПД. Также обсуждается оптимизация коэффициента смещения зубьев для уменьшения износа без использования сложного оборудования. Исследования по этим вопросам приводят к противоречивым результатам, что требует дальнейшего изучения геометрических параметров износа и прямозубых механизмов, с целью повышения их эффективности и надежности в различных условиях.

Введение. В современных механических системах прямозубые передачи широко используются благодаря своей простой конструкции, удобству производства и высокой эффективности. Они обеспечивают прямолинейное сцепление зубьев, что значительно упрощает процесс проектирования и изготовления. Хотя по плавности работы они уступают косозубым передачам, их преимущество заключается в сниженных осевых нагрузках и более экономичном производстве. Благодаря этим особенностям прямозубые колеса остаются востребованными в различных отраслях машиностроения и промышленности.

Объект исследования. При создании прямозубых зубчатых механизмов особое внимание уделяется прочностным характеристикам, габаритам и эксплуатационным свойствам, поскольку от этих параметров зависит надежность и эффективность работы всей системы. Важной особенностью данных передач является то, что их зубья передают нагрузку без наклона, что требует тщательного расчета таких параметров, как модуль, количество зубьев и ширина венца. Эти характеристики определяются на основе сложных инженерных методик и многочисленных испытаний, позволяя добиться оптимального зацепления. Благодаря такому подходу удается не только повысить допустимую нагрузку, но и обеспечить стабильность и долговечность передачи крутящего момента, что особенно важно в ответственных механических системах.

Вопрос влияния модуля и количества зубьев прямозубых передач на их износостойкость в имеющихся исследованиях часто приводят к неоднозначным и противоречивым выводам. Научные исследования показывают, что любые изменения в геометрии зацепления оказывают влияние на скорость износа и уровень возникающих динамических нагрузок. Однако такие эксперименты проводятся в контролируемых условиях и не всегда способны в полной мере воспроизвести реальные эксплуатационные факторы, что создает определенные трудности при прогнозировании надежности и долговечности подобных передач в различных механических системах.

Некоторые исследования утверждают, что геометрические параметры прямозубых передач не оказывают значительного влияния на их износостойкость. Однако следует учитывать, что испытуемые передачи отличались не только по таким параметрам, как модуль, диаметр начальной окружности и ширина венца, но и по условиям проведения экспериментов. Эти различия значительно усложняют процесс сопоставления результатов, так как изменения в экспериментальных условиях могут оказывать заметное влияние на конечные показатели износа, что затрудняет выводы о влиянии конкретных геометрических характеристик на износостойкость.

Метод исследования. Исследования проводились при различных условиях смазки, включая масла, содержащие абразивные частицы, а также в чистом масле МС-20 [1]. Основное внимание было уделено изучению несущей способности прямозубых передач, которая ограничена сопротивлением выкрашивания рабочих поверхностей зубьев. В ходе экспериментов проанализировано влияние геометрических параметров зубчатых колес на этот процесс. Результаты показали, что изменение геометрических характеристик, таких как модуль и ширина венца, оказывает существенное воздействие на интенсивность износа зубьев, что напрямую сказывается на долговечности и эффективности работы прямозубых передач в различных условиях эксплуатации [2].

Различия в результатах существующих исследований подчеркивают необходимость продолжения изучения влияния геометрических характеристик прямозубых передач на их износостойкость. Несмотря на то, что большинство данных свидетельствует о значительном влиянии геометрии на износ зубьев, на данный момент не существует единого мнения о том, какие именно параметры являются решающими. В качестве критериев износа прямозубых передач рассматриваются такие показатели, как скорость и удельное скольжение профилей зубьев, коэффициент скольжения, путь относительного скольжения, удельная работа трения, коэффициент ускоренного скольжения, а также путь трения. Дополнительно учитываются и другие параметры, связанные с контактными напряжениями и динамическими нагрузками, которые оказывают влияние на процесс износа и долговечность передач.

Различные факторы, оказывающие влияние на износ прямозубых передач, объясняют тем, что существующие критерии износа не всегда позволяют точно интерпретировать разницу в степени изнашивания по высоте зуба. Многие из этих причин не учитывают особенности износа в области полюсов зацепления, поскольку параметры, используемые для этой цели, принимают нулевые расчетные значения. Для того чтобы более точно оценить скорость изнашивания, приближенную к экспериментальным данным, приведите среднее значение критерия износа, используемого для участка рабочей линии зацепления. Этот показатель представляет собой произведение квадратного шага с учетом радиуса кривизны и скорости скольжения поверхности зубов. Такой метод позволяет более точно оценить износ зубов именно в области полюсов зацепления, как правило, вызывает усиление износа зубов в условиях эксплуатации [3].

Геометрические параметры зацепления оказывают существенное влияние на снижение изнашивания, что приводит к поиску различных способов повышения износостойкости прямозубых передач [4]. Одним из таких подходов является использование альтернативных профилей зубьев, которые, как правило, улучшают эксплуатационные характеристики. Однако их внедрение в промышленное производство осложняется необходимостью разработки специализированного зуборезного инструмента. В то же время оптимизация долговечности прямозубых передач может быть достигнута без использования сложного оборудования, если внести изменения в параметры зацепления в рамках стандартной технологии. Это возможно путем смещения исходного контура при нарезании зубов, а также регулировки модуля и количества зубьев, что позволяет повысить производительность и поддержку механизмов, не требуя дополнительных затрат на производство специализированных.

Исследования, посвященные влиянию смещения исходного контура и выбору коэффициентов смещения, которые приводят к наибольшему использованию прямозубых

передач, имеют важные результаты. Выяснилось, что изменение коэффициента смещения влияет на уменьшение износа зубчатых колес. При небольшом снижении износа (3–5%) вынесение исходного контура допускает снижение скорости изнашивания. Однако при более высоком верхнем износе (15–18%) зубы начинают заостряться, и опасное перемещение перемещается в вершины зоны, что увеличивает риск повреждения. Исследования также показали, что коэффициент смещения может происходить в широких пределах, что не обеспечивает значительного воздействия на износ, но его выбор имеет свои ограничения: с одной стороны существует риск подрезания зубов, с другой — возникает заострение, которое определяет допустимый уровень износа. В условиях эксплуатации в пыльной среде рекомендуется минимизировать коэффициент смещения для предотвращения ускорения

Как было отмечено ранее, изменение параметров зацепления, используемых в качестве критерия износа для эвольвентных передач, может быть достигнуто путем регулирования модуля и, соответственно, числа зубьев при постоянных диаметрах начальных окружностей зубчатой пары. Это позволяет оптимизировать процесс износа без необходимости менять другие ключевые параметры, такие как геометрия зубьев, что дает возможность более гибко подходить к проектированию и улучшению долговечности передач [1,2,4].

Уменьшение модуля и увеличения числа зубьев при неизменном диаметре колес в прямозубых передачах способствует уменьшению удельного скольжения, что, в свою очередь, повышает коэффициент полезного действия (КПД) и снижает ограничения заедания. При одинаковой точности передачи меньший модуль позволяет снизить ошибки зацепления, что позволяет уменьшить масштабную зависимость и увеличить коэффициент перекрытия. Также уменьшение модуля приводит к уменьшению диаметра окружности головок зубьев, уменьшению толщины обода, что позволяет сократить расход материала и сократить обработку. Однако стоит отметить, что с уменьшением модуля увеличивается неравномерность распределения нагрузки по длине зуба, а также уменьшается запас изгибной прочности. Это может стать критическим для силовых механизмов, работающих в условиях абразивного изнашивания, где такие характеристики играют ключевую роль в обеспечении ликвидности и надежности [5].

В научной литературе можно встретить исследования, посвященные величине коэффициента модуляции и числа зубьев прямозубых эвольвентных передач. Эти работы показывают, что модуль влияет не только на скорость изнашивания и ее изменения в процессе эксплуатации, но и на прочность зубьев при изгибе. Определение размера модуля обеспечивает передачу передачи, возможно, на основе допустимого уровня износа, который зависит от изменений геометрических параметров и параметров передачи. Таким образом, выбор оптимальной модуля для прямозубых передач остается актуальной темой, требующей текущих исследований для точной оценки различных факторов, влияющих на их износ.

Заключение.

1) **Популярность прямозубых передач** обеспечивает их простоту, удобство в производстве и высокую эффективность. Эти передачи, несмотря на менее плавную работу по сравнению с косозубыми, обладают преимуществами в виде более низких осевых позиций и меньших затрат на изготовление, что делает их востребованными в машиностроении.

2) **Геометрические параметры имеют большое значение** для долговечности прямозубых передач. Такие параметры, как модуль количества зубьев и ширина венца, напрямую влияют на прочность и эффективность передачи. Их правильный расчет и оптимизация - важные аспекты для достижения эффективной и надежной работы систем.

3) **Противоречивые исследования:** Существующие исследования относительно оценки износа прямозубых передач не дают однозначных результатов. Несмотря на эффективность оценки износа, не существует сложных мнений о том, какие параметры играют главную роль, что указывает на необходимость дополнительных исследований.

4) **Необходимость дополнительных исследований:** Для более точного прогноза степени прямозубых перемещений требуется углубленное изучение геометрических

характеристик. О текущих исследованиях еще рано говорить как о завершенных, так как влияние факторов на износ до конца не раскрыто.

5) **Методы повышения износостойкости:** Для повышения износостойкости используют такие методы, как изменение коэффициента смещения контуров зубьев и регулирование модуля и количества зубьев. Эти подходы позволяют улучшить долговечность без необходимости применения дорогого специализированного оборудования.

6) **Снижение модуляции и увеличения количества зубьев** способствует уменьшению удельного скольжения и увеличению КПД. Однако это также может привести к неравномерному распределению нагрузки и снижению гибкой прочности зубьев, что важно для передачи больших нагрузок в условиях абразивного износа.

Литература:

1. Трение, износ и смазка: (Трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; Под общ. ред. Чичинадзе А.В. - М.: Машиностроение, 2003. – 575 с.
2. Шигли, Дж. Э., Мишке, Ч. Р. Проектирование машиностроения. М.: МакГроу-Хилл, 2011. 1088 с.
3. Дадли, В. Д. Механизмы: иллюстрированное руководство по их теории и конструкции. М.: МакГроу-Хилл, 1991. 23 с.
4. Сафиуллин, Р. Н., Керимов, М. А., Валеев, Д. Х. Конструкция, расчет и эксплуатационные показатели строительных и транспортно-технологических машин: учебник. М.: Изд-во Юрайт, 2019. 484 с.
5. Акопян М. Г. Модель изнашивания зубчатых колес, учитывающая эволюционный характер процесса взаимодействия // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. — 2017. — No 3 (43). — С. 106–120. — DOI: 10.21685/2072-3059-2017-3-9.

Influence of geometric parameters of spur gears on durability

Popov A.M.^{1,a}, Mehdiiev R.V.O.^{1,b}

¹Kemerovo State University, Stroiteley Boulevard 47, Kemerovo.

^bmehdiiev23@mail.ru

Keywords: Spur gears, geometric parameters, wear resistance, wear, gear optimization.

Modern tooth gears are widely used in mechanical devices due to their simplicity, high efficiency and ease of production. However, their application and durability depend on geometric parameters such as module, number of teeth and crown width. These characteristics help to reduce wear and increase the load during operation. The article discusses the influence of changes in the wear value of spur gears, as well as methods for increasing their wear resistance. One of these methods is to regulate the module and number of teeth with a constant wheel diameter, which leads to specific slip and increased efficiency. Optimization of the tooth offset coefficient to reduce wear without the use of complex equipment is also discussed. Research on these issues leads to contradictory results, which requires further study of the geometric parameters of wear and spur mechanisms in order to improve their efficiency and reliability under various conditions.

Краткий анализ применимости современных экзоскелетных технологий в промышленности

Горунович С.Б.^{a,b}

У-ИТЭЦ ООО «Байкальская энергетическая компания», г. Усть-Илимск, Россия

^aGorunovich@baikalenergy.com, ^bGorunovichs@mail.ru

Ключевые слова: экзоскелет, промышленность, тяжелые грузы, применение.

В данной работе мы провели краткий анализ использования экзоскелетов в промышленности в качестве средства для поднятия и перемещения тяжелых грузов. Предварительно изучили физические особенности человеческого организма с точки зрения биомеханики поднятия снарядов спортсменами – тяжелоатлетами. Выявили необходимые требования и ограничения для эффективного использования экзоскелетов в подобных операциях. Провели обзор и анализ конкретных моделей экзоскелетов из доступных рекламных источников. Изучили потенциальные возможности и ограничения конструкций экзоскелетов с точки зрения сопротивления материалов и теоретической механики. В частности произвели расчет теоретически максимально возможной грузоподъемности и необходимой мощности приводов экзоскелета. Провели сравнение с грузоподъемными приспособлениями со сходными функциями. Представили возможную кинематическую схему идеального механизма для разгрузочно-погрузочных операций.

Пришли к выводу, что наибольший потенциал экзоскелетные технологии имеют в области реабилитации при потере или снижении двигательных функций, а также в области профилактики профессиональных заболеваний опорно-двигательного аппарата. Пришли к следствию, что в первую очередь важно расширять использование грузоподъемных приспособлений. При этом совершенствовать их конструкцию, объединяя преимущества антропоморфных моделей и существующих типов приспособлений.

В современной промышленности постоянно идет поиск новых приемов и методов, способных повысить производительность труда и снизить себестоимость выпускаемой продукции. Методы имеют как организационный характер, (за счет лучшей организации труда) так и технический (за счет внедрения новых технологий, механизации ручного труда и автоматизации). Целью настоящей работы явился краткий анализ целесообразности использования современных экзоскелетов в качестве подъемно-транспортных приспособлений и их конкурентоспособность по сравнению с существующими.

Наиболее распространенное строгое определение экзоскелета – устройство, предназначенное для увеличения силы человека за счет внешнего каркаса [1], в более расширенной смысловой трактовке – это также механизм, предназначенный для восполнения утраченных функций человека. Принципиальную схему экзоскелета можно представить в виде рис.1, где отмечена аналогия между частями человеческого организма и механизмами экзоскелета в их функциональной взаимосвязи. Очевидно, что критерии совершенства экзоскелета будут всегда проистекать из копирования и совершенствования человеческого функционала и дублирования возможных «слабых мест» в человеческом организме. Впрочем, схема на рис.1 не симметрична и сразу иллюстрирует один из недостатков современных существующих экзоскелетов – отсутствие прямой функциональной связи между нервной системой человека и системой управления. Действительно управление экзоскелетом, как правило, осуществляется через мускульные усилия с обратными связями от датчиков, которые также подают сигналы в систему управления от мышечных тканей (резистивные электромиографические (ЭМГ–) датчики или датчики мышечной активности).

Как таковой человеческий организм имеет большую степень подвижности за счет наличия различных многофункциональных суставов в скелете. Костный скелет сам по себе

представляет собой прочную основу на которую приходятся основные нагрузки в процессе функционирования организма, в т. ч. при поднятии и транспортировке тяжестей. При этом легко предположить, что в данном случае наиболее важное значение для опорно-двигательного аппарата имеют голеностопный, коленный и тазобедренный сустав, плечевой сустав, рис.2а.

В источнике [2] детально рассмотрены характерные особенности человеческого скелета и суставов. Перечислим главные из них. Плечевой сустав трехосный, по форме относится к шаровидным суставам. Благодаря тому, что плечевой сустав является наиболее подвижным суставом человеческого тела, рука обладает значительной свободой движения. Тазобедренный сустав является разновидностью шаровидного сустава – это чашеобразный сустав. Эта разновидность шаровидного сустава (*articulatio spherioidea*) выделяется в группу ореховидных суставов (*enarthrosis*). Следовательно, движения в ореховидном суставе, как и у всякого многоосного сустава, разнообразны. Коленный сустав характеризуется исключительно высокой подвижностью вокруг поперечной оси: активное сгибание 130° , пассивное сгибание может добавить ещё 30° , максимальное разгибание из среднего положения составляет $10\text{--}12^\circ$. Голеностопный сустав по форме относится к блоковидным. Сгибание (подошвенное сгибание) и разгибание (тыльное сгибание) в нем происходят вокруг фронтальной оси. Суммарный объем движений равен $60^\circ\text{--}70^\circ$ [2].

При этом с точки зрения теории машин и механизмов голеностопный и коленный сустав можно условно отнести к простому шарниру – вращательной кинематической паре с одной (вращательной) степенью свободы. Тазобедренный и плечевой сустав – к сферической кинематической паре (к сферическому шарниру) с тремя вращательными степенями свободы, рис.2 а).

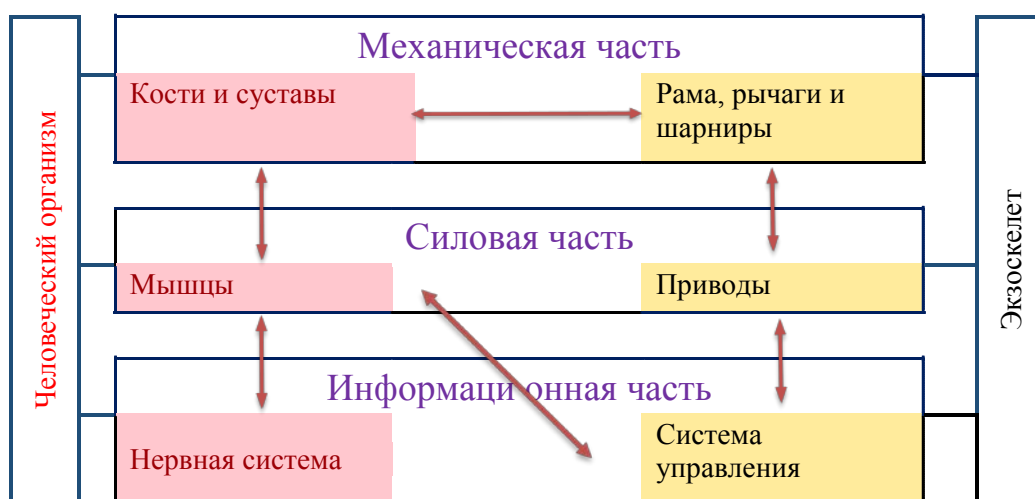


Рис.1. Принципиальная структурная схема экзоскелета

В контексте рассмотрения характерных особенностей организма в процессе поднятия тяжестей полезно проанализировать биомеханику тяжелоатлетического упражнения – поднятие штанги рывком, рис.2.б. Как справедливо отмечено в [3], при выполнении рывка огромное значение имеет обеспечение равновесия системы «спортсмен – штанга». Лучшим условием равновесия является расположение общего центра тяжести (ОЦТ) системы над серединой опоры. Поэтому при выполнении первой фазы подъема штанги ОЦТ системы должен перемещаться вертикально, все время, оставаясь примерно над серединой опоры [3]. Последняя часть рывка «подсед – вставание» состоит из трех фаз. Главная двигательная задача подседа – быстрое и точное опускание под штангу (до подъема ее на прямые руки над головой). Главная задача при вставании – сохранение равновесия. Заканчивается вставание фиксацией штанги над головой [3].

На рис. 2б проиллюстрированы три основные фазы упражнения. На рисунке ЦТ – центр тяжести спортсмена – штангиста, R_1 – реакция опоры, F – сила тяжести штанги.

Очевидно для выполнения требования расположения ОЦТ системы над серединой опоры (на оси действия R_1), спортсмен вынужден отклоняться вначале назад (отрывая штангу от пола), затем вперед (в процессе приседа) для компенсации момента от силы тяжести штанги собственным весом.

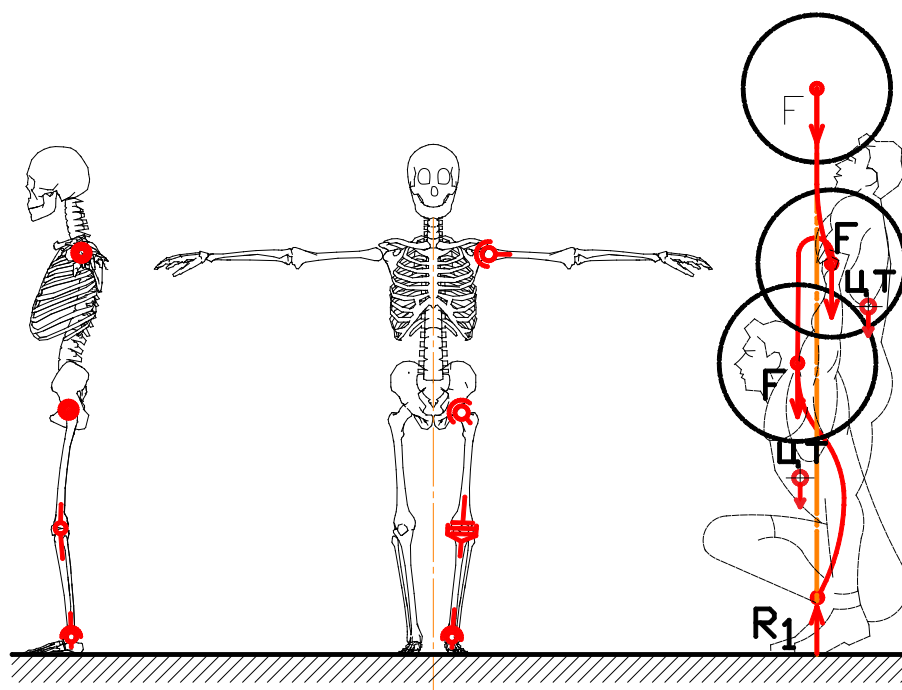


Рис. 2. а) Суставы – шарниры в человеческом организме, б) траектория движения штанги в упражнении «Рывок» с приседом.

При этом спортсмен старается минимизировать плечо момента силы тяжести, минуя промежуточное положение рывком, сохраняя равновесие. Штангист поднимает груз в основном за счет мускульной силы ног и таза, сохраняя ровную спину. На уровне мировых стандартов спортсмен с собственным весом до 81 кг способен поднять рывком 170 кг (мировой рекорд 2020 г. Ли Даинь, Китай, 175 кг).

Данное упражнение ярко иллюстрирует главное «слабое место» человеческого организма при поднятии тяжестей – человек не способен удерживать значительный груз на сколько-либо значительном «вылете» – расстоянии от его собственного центра тяжести. При этом ему необходимо отклоняться в противоположную сторону от груза для удержания равновесия. Похожую ситуацию можно наблюдать при перемещении с грузом. Спортсмен удерживает груз строго вертикально, малейшее перемещение самого груза, либо спортсмена с грузом создает силы инерции, совладать с которыми требует дополнительных значительных усилий. Лишь сохраняя вертикальное, неподвижное положение человек способен выдерживать значительный груз.

В целом можно сделать вывод, что в силу прямохождения на двух конечностях сохранение равновесия при поднятии и перемещении груза и есть пресловутое «слабое место» человеческого организма.

Рассмотрим несколько конструкций рекламируемых промышленных экзоскелетов, информация о которых находится в свободном доступе.

Российские экзоскелеты «ЕхоHeaver» [4, 5]. Авторы разработки – компания «ЭкзоМед», которая была создана на базе лаборатории мехатроники и робототехники Курского Юго-западного Университета. Согласно данным производителей промышленные экзоскелеты применяются для подъема, удержания и перемещения грузов, а также

поддержания тела при длительном пребывании в неудобном положении. Они снижают и перераспределяют нагрузку, сохраняя здоровье работников и повышая производительность труда [4, 5].

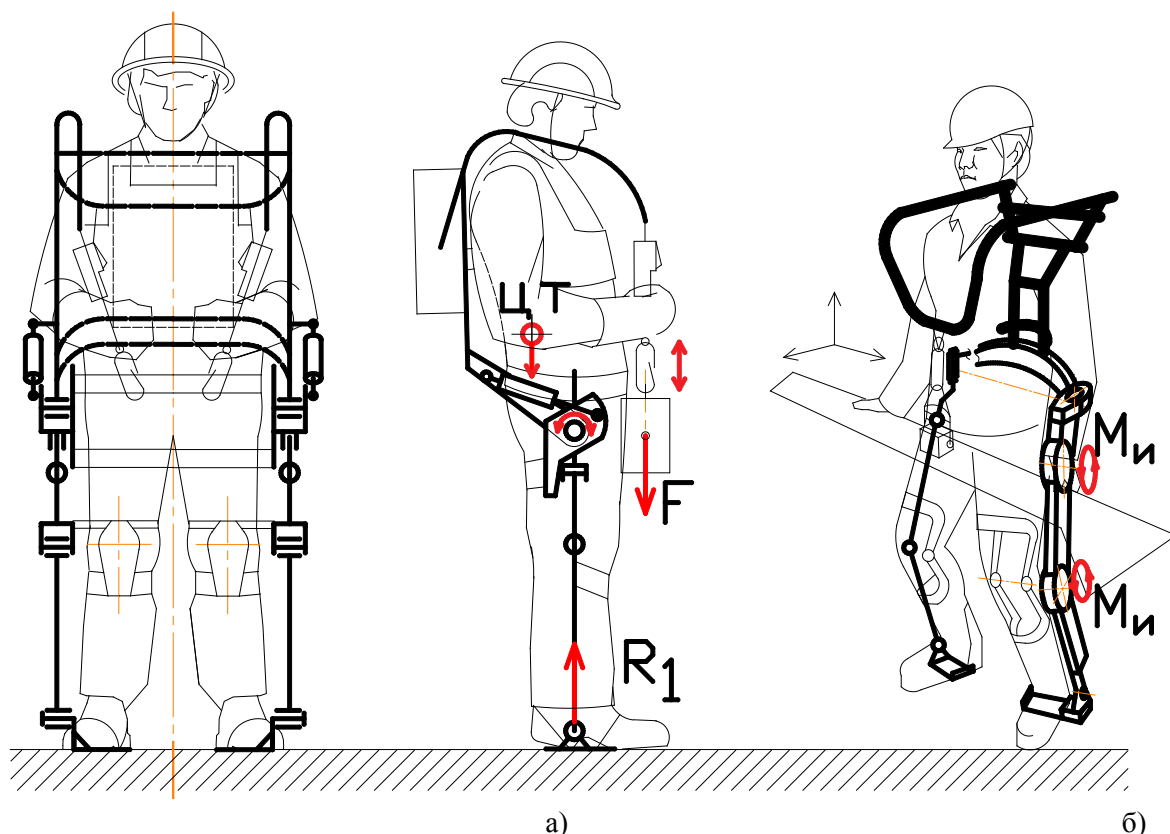


Рис. 3. Кинематические схемы экзоскелетов

а) модель «ExoHeaver Active Electric» (Россия); б) модель «Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Exoskeleton» (Южная Корея)

Краткие характеристики «ExoHeaver»: габариты – $1,7 \times 0,5 \times 0,4$ м; масса – 24 кг; предельно допустимая нагрузка – 60 кг; подъём грузов электроприводом со скоростью до 8 см/с, максимальная высота подъёма груза – 1,5 м; стоимость от 1 020 000 руб. [4].

Корейский экзоскелет, рис.3 б), демонстрирует сходные с «ExoHeaver» показатели грузоподъёмности. При этом его работа на одном заряде батареи менее продолжительна, он больше весит и намного больше стоит. Будучи разработан по заказу судостроительного подразделения «Daewoo», экзоскелет в настоящее время используется только на верфях корпорации и в продажу не поступает [4].

Анализируя схемы экзоскелетов, рис.3, можно отметить все то же «слабое место» комплекса – «человек+экзоскелет», свойственное человеческому телу: эффективно манипулировать грузом человек даже в экзоскелете способен только в статическом положении, наклоняясь либо расставляя ноги (создавая упор одной из ног) для сохранения равновесия. Для компенсации внутренних изгибающих моментов ($M_{и}$ – на рис.3) возникающих от внешней нагрузки (силы F_1) мышечной силе человека очевидно помогают электроприводы и компенсаторы (в российском экзоскелете на уровне тазобедренного сустава, в корейском варианте на уровне коленного и тазобедренного). При этом сферическую кинематическую пару (тазобедренный сустав) в экзоскелете реализуют набором обычных поворотных шарниров, привод при этом имеет только один (в вертикальной плоскости). Это дает возможность человеку в экзоскелете оставаться в промежуточных положениях под нагрузкой (с наклоненной спиной, согнутыми ногами). Подъём груза осуществляется электроприводами (лебедкой). Эффективно двигаться с

максимальным грузом (на-пример со скоростью пешехода) в подобном экзоскелете человек не способен.

Рассмотрим еще одно широко рекламируемое изделие с более широким спектром использования, а именно армейский образец экзоскелета американской фирмы «Raytheon» [6], рис.4. «Raytheon» показала возможности своего костюма «XOS 2» уже в конце 2010 года. Согласно [6] солдат, одетый в костюм, может ходить, бегать и, даже споткнувшись, быстро восстанавливает равновесие. Несмотря на вес экзоскелета (95 кг), солдат в костюме очень подвижен, его движения ничто не сковывает: можно спокойно подниматься по лестнице, колотить боксерскую грушу или играть в мяч. Костюм позволяет человеку поднимать 25 кг каждой рукой практически не прилагая усилий. В среднем, военнослужащий материально-технического обеспечения и поддержки может поднимать и переносить в экзоскелете до 7 тонн в день не рискуя потерять все силы от усталости. Механика движений костюма «XOS 2» построена на целой системе гидравлических приводов. Прототип пока использует внешний источник питания, подключаемого с помощью кабеля. Различные датчики, установленные по всей системе, контролируют все изменения и передают данные в компьютер, который рассчитывает необходимое в то или иное время усилие на каждый из гидроприводов [6].

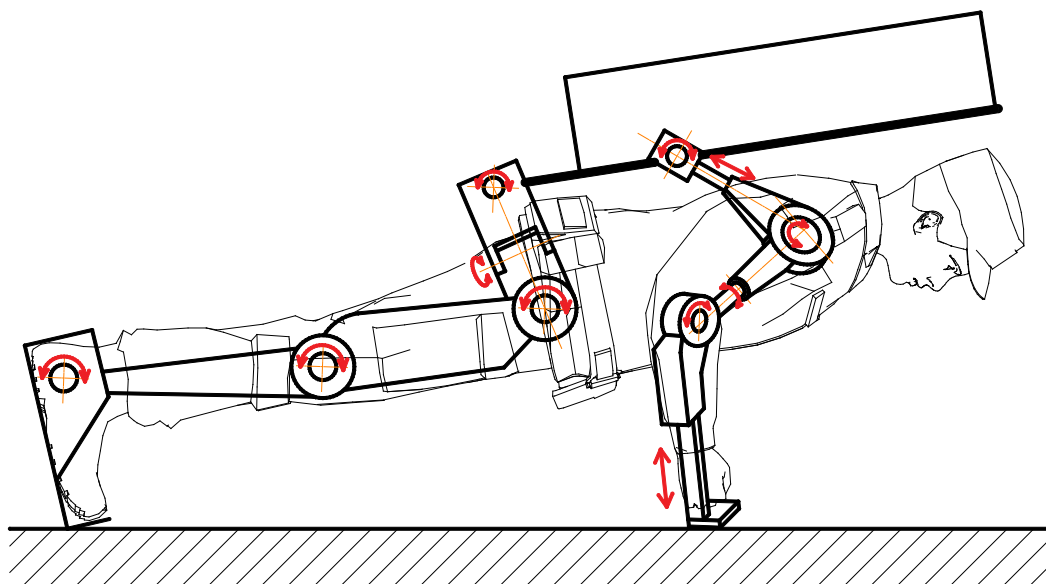


Рис. 4. Кинематическая схема экзоскелета «XOS 2 Raytheon» (США)

На рис. 4 представлена примерная кинематическая схема экзоскелета с обозначенными «стрелками» степенями подвижности. Совершенно очевидно, что данный образец по сравнению с вышеупомянутыми промышленными значительно более сложный и высокотехнологичный. При этом для переноски тяжестей солдат в экзоскелете, очевидно использует «рюкзак» за спиной, что на практике усложняет погрузочно-разгрузочные операции. Осуществлять какие-либо точные манипуляции с грузом «на весу» в таком костюме затруднительно, в отличие от промышленных образцов, рис. 3. Ведь хотя бы одной рукой солдату придется держать груз, а условия равновесия системы «человек-экзоскелет с грузом» остаются прежними. Конечно, справедливо упомянуть, что это армейский экзоскелет не предназначен для использования в промышленности. Насколько «XOS 2» окажется перспективным в условиях военных действий покажет будущее. Как показывает современная практика, для скрытых логистических операций чаще используются различные автоматические аппараты – дроны, как на базе самоходных шасси, так и на базе квадрокоптеров. Соответственно, на сегодняшний день можно считать «XOS 2» чисто экспериментальным образцом, направленным скорее на отработку передовых технологий и далеким от практического применения.

Анализируя качества современных экзоскелетов, попробуем для оценки их эффективности пойти обратным путем – сравнить их с механизмами и грузоподъемными приспособлениями (обратная эволюция).

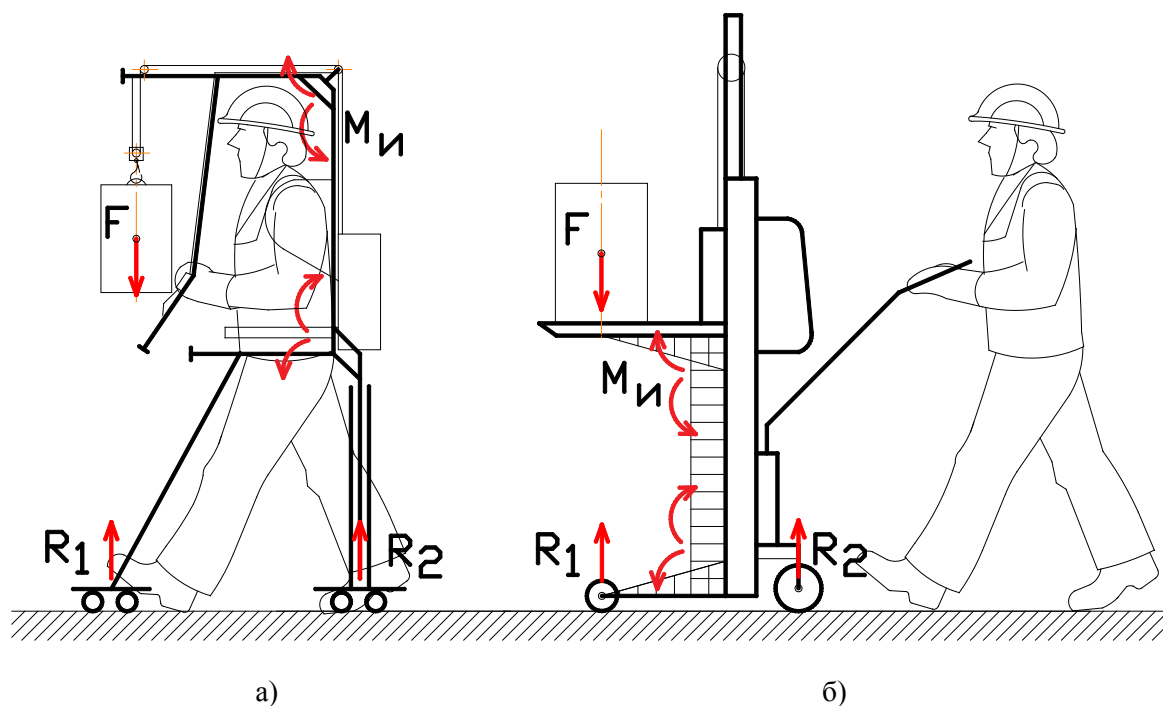


Рис.5. Обратная эволюция «экзоскелет – приспособление»
а) промежуточный вариант «экзоскелет-грузоподъемное приспособление»;
б) грузоподъемное приспособление «штабелёр с ручным управлением»

Рассмотрим гипотетический промежуточный вариант «экзоскелет-грузоподъемное приспособление» см. рис.5, а). Здесь законы механики диктуют необходимость как минимум трех жестких опор у механизма. Для эффективного перемещения опоры должны быть снабжены колесами-роliками. В условиях большинства производственных площадок этого вполне достаточно. Для поддержки груза в пределах вылета стрелы приспособление должно обладать жесткой рамой, воспринимающей изгибающие моменты $M_{И}$ от действия веса груза F . Для равновесия системы проекция максимального вылета стрелы $L_{\max}$ должна всегда находиться в площади треугольника с реакциями опор $R_1 - R_2$ в его углах. Рабочий двигает приспособление с грузом, преодолевая лишь силы трения качения и силы инерции, может поворачивать стрелу, манипулировать грузом. Приспособление снабжено ручками и органами управления лебедкой. Сравнивая данную конструкцию с экзоскелетами рис.3, можно отметить только одно явное отличие – экзоскелеты оснащены «шагающей платформой», т.к. перемещение связано с функцией человеческой ходьбы. Шагающая платформа, на первый взгляд кажется преимуществом, ведь человек в таком экзоскелете способен преодолевать препятствия, обычно не доступные для колесной платформы. Но прежде чем прийти к такому выводу следует рассмотреть математическую модель движения человека подробнее. На-пример автор [7] подчеркивает, что для эффективного моделирования такого движения необходим синтез управляющих воздействий для перемещения робота-андроида в статически-неустойчивых режимах (с устойчивостью к опрокидыванию), в том числе с применением динамического уравнивания путем смещения центра тяжести, при расчете которых также используются технологии параллельных вычислений, управление с прогнозирующими моделями и машинное обучение [7–11].

Другими словами шагающая антропоморфная платформа характеризуется очень сложной конструкцией и управлением, к тому же для реализации перемещения с грузом

совершенно необходимы сервоприводы и тазобедренного, и голеностопного, и коленного суставов, что отсутствует в моделях рис.3.

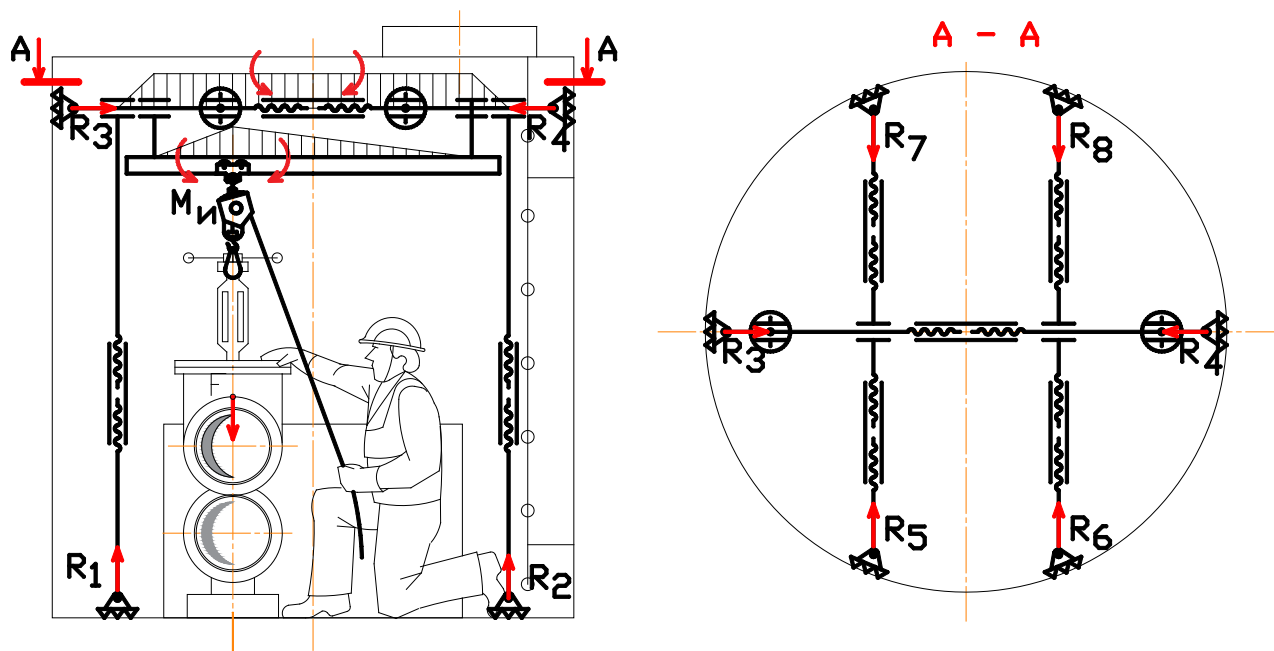


Рис.6. Использование распорных конструкций для погрузочно-разгрузочных операций в узком пространстве

Если продолжить «обратную эволюцию» в сторону приспособлений, рис. 5, то можно обратиться к конструкции обычного ручного штабелёра, широко используемого для перемещения, погрузочно-разгрузочных операций с грузами в складских помещениях, рис.5 б). Если сравнить данную конструкцию с предыдущей с точки зрения охраны труда она является более безопасной, т.к. работник выводится из опасной зоны случайного взаимодействия с грузом, например в случае его падения или других аварийных ситуаций.

Рассуждая о достоинствах и недостатках экзоскелетов и приспособлений, стоит коснуться проблемы компактности. Действительно в промышленности часто существует необходимость производить манипуляции с тяжелыми грузами в достаточно узком пространстве, недоступном для штатных грузоподъемных механизмов. В данном аспекте экзоскелеты типа рис.3, 4 имеют неоспоримое преимущество по сравнению с приспособлениями рис.5. При этом экзоскелеты опять же не безальтернативны.

Силовую опорную конструкцию, в т. ч. и для подвешивания групповых талей можно создать из набора унифицированных распорных телескопических или/и винтовых стоек, рис.6. Всю конструкцию можно перенести по частям и собрать в нужном месте, например в железобетонном колодце. По сравнению с необходимостью проведения земляных работ и снятия перекрытия колодца в обычных условиях, использование предложенной конструкции (или экзоскелета) выглядит намного предпочтительнее. В настоящее время подобные стойки используются для строительства горнодобывающей промышленности для временного крепления горных выработок, в других отраслях промышленности в качестве строительных лесов, швартовых домкратов и т.п. На китайском предприятии («Tianjin Shisheng Scaffolding & Formwork Group Co., Ltd.») в Тяньцзине предлагается широкая номенклатура подобных изделий, на-пример: «SS U-образная головка; окрашенная, сверхпрочная, телескопическая, регулируемая, стальная опора-стойка» (стоимость от 884,87 до 1 769,74 руб./шт.) [12]. Российское производство предлагает хороший выбор грузоподъемных талей как с электроприводом, так и ручных грузоподъемностью от 500 кг до 20 т (на-пример цепные тали ТРШС фирмы «СИБТАЛЬ»).

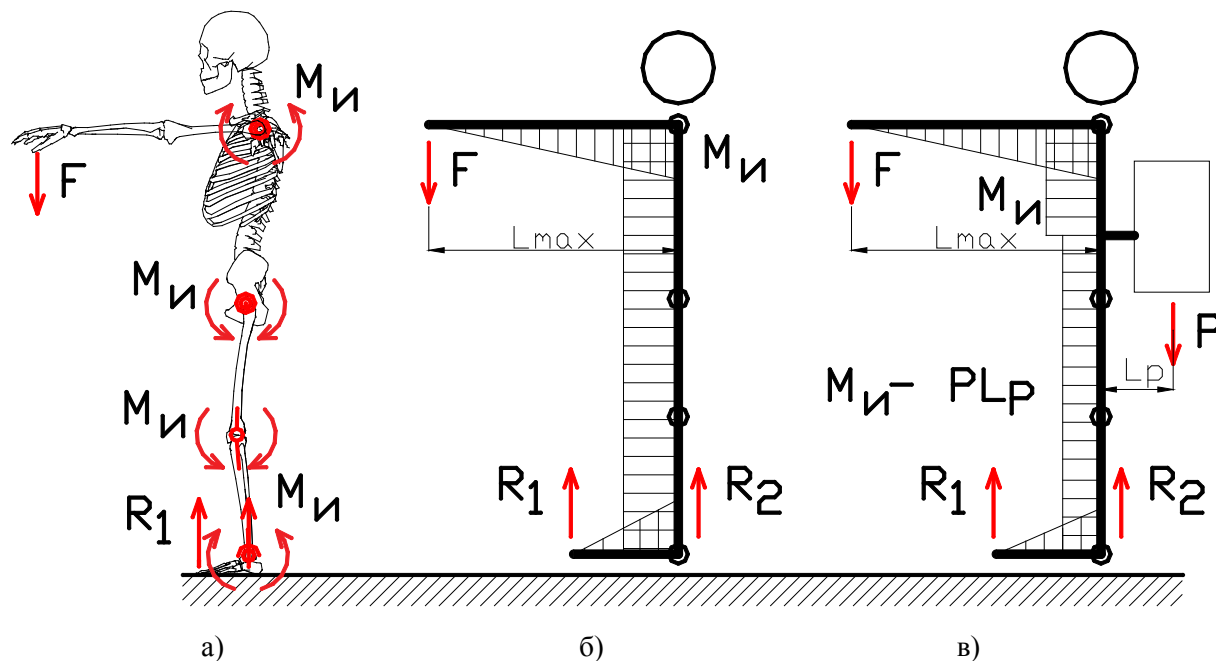


Рис.7. Расчетные схемы экзоскелетов

а) силы и моменты, действующие на человеческий организм; б) эпюра внутренних изгибающих моментов; в) эпюра внутренних изгибающих моментов с противовесом (рюкзаком)

Исходя из расчетных схем силовых рам экзоскелетов и приспособлений рассчитаем теоретически максимальную грузоподъемность таких систем, рис. 3 – 5. Как уже упомянуто выше для поддержки груза в пределах вылета стрелы $L_{\max}$ приспособление (или экзоскелет) должен обладать жесткой рамой, воспринимающей изгибающие моменты $M_{\text{И}}$ от действия веса груза F , рис.7. Систему будем считать статической, уравновешенной реакциями опор R_1 , R_2 . Материал рамы должен быть прочным и легким, например из литейных марок алюминия, в частности сплава с цинком и магнием AW-7075 - 3.4365. Такой материал имеет предел прочности $\sigma_{\text{в}}=560$ МПа и плотность 2821 кг/м^3 , что делает его более чем в два раза легче стали. Конечно перспективными материалами являются также различные композиционные, из углеволокна и т.п. Но т.к. изделия из алюминиевых сплавов лучше освоены, имеется в продаже разнообразный сортамент (труба, лист, круг), в отношении цена-качество данный материал выглядит предпочтительнее.

Максимальная грузоподъемность $Q_{\max}$, Н, очевидно, будет зависеть от свойств материалов и сечения стрелы и может быть найдена по формуле:

$$Q_{\max} = [\sigma] W / L_{\max};$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение; W – момент сопротивления сечения стрелы, в случае использования трубы, W можно определить по формуле:

$$W = 0,1 D_n^3 (1 - [(D_n - 2s)/D_n]^4);$$

где D_n – наружный диаметр трубы; s – толщина стенки.

Максимальный изгибающий момент в сечении:

$$M_{\text{ИМакс}} = Q_{\max} L_{\max}. \quad (1)$$

Зададимся исходными данными, подбирая доступные на сегодняшний день материалы: стрела – труба $D_n=0,04$ м (40 мм); $s=0,003$ м (3 мм) из алюминиевого сплава AW-7075 - 3.4365 $[\sigma] = 560 \times 10^6$ Па. Вылет стрелы примем $L_{\max} = 0,5$ м.

Получим $Q_{\max} = 3426$ Н, что эквивалентно массе порядка 350 кг. С учетом коэффициента запаса, можно считать, что используя современные, доступные материалы, можно достичь максимальной грузоподъемности экзоскелета порядка 300 кг. При этом, напомним, для модели «ЕхoHeaver» предельно допустимая нагрузка – 60 кг. Очевидно, на данном этапе развития технологии, существуют другие ограничения, которые мешают быстро достичь более высокой грузоподъемности. Здесь стоит упомянуть изгибающий момент, который должен компенсироваться приводами экзоскелета для эффективного

перемещения экзоскелета с максимальным грузом. В качестве привода шарниров в промышленных экзоскелетах чаще всего используются электропривод: сервомоторы, мотор-редукторы.

Воспользовавшись формулой (1) и ориентировочными числовыми значениями выше, определим $M_{u\text{Макс}}=1500$ Нм. Такие значения являются довольно значительными для компактных электромоторов и могут быть достигнуты только за счет использования редукторов со значительными передаточными числами. Кстати, управляющие моменты мышечных сил в суставах тяжелоатлета при подъеме штанги весом 140 кг в упражнении «Рывок» согласно оценкам в источнике [3] достигают 1200 Нм в тазобедренном суставе, 700 Нм в голеностопном и 300 Нм в коленном. Т.е. вероятно, из необходимости компенсировать силу инерции самого груза максимальный момент привода должен быть даже выше.

Оценим ориентировочно необходимую для этого мощность электродвигателя. Для этого можно воспользоваться математическими моделями походки человека, в частности функциями углов опорной и переносимой ног [13]. На-пример при перемещении ноги имеет место следующее выражение для функции угла поворота тазобедренного сустава [13]:

$$\Phi(t) = -0,198 + 4,546 t - 17,540 t^2 + 45,266 t^3 - 53,113 t^4 + 5,413 t^5$$

на отрезке аппроксимации от 0 до 0,5 с.

Продифференцируем функцию и получим выражение для изменения угловой скорости сустава (шарнира):

$$\omega(t) = d\Phi(t)/dt = 4,546 - 35,080 t + 135,789 t^2 - 212,452 t^3 + 27,065 t^4.$$

Имеем максимальное значение выражения: $\omega_{\text{макс}} = \omega(0) = 4,546$ 1/с.

Отсюда необходимая максимальная мощность: $P_{\text{макс}} = \omega_{\text{макс}} M_{u\text{Макс}} = 6,819$ кВт.

Получим очень высокую мощность для компактного электромотора. В справочниках можно узнать, что средняя удельная мощность бесколлекторного электродвигателя равна около 4,5 киловатт на килограмм, но при этом на самых высоких оборотах (выше 3000 об./мин. ≈ 314 1/с). Можно привести пример современного вентильного электродвигателя постоянного тока со следующими характеристиками: напряжение – 48В/72В/96В; номинальная/пиковая мощность – 3/8,6 кВт; номинальный/пиковый момент – 8/25 Нм; частота вращения – 3600 об./мин.; алюминиевый корпус диаметром 180 мм и длиной 125 мм весом 8 кг. Что выглядит слишком громоздко даже без учета размеров и веса необходимого редуктора. Специализированные сервомоторы постоянного тока китайского производства часто имеют в комплекте дополнительное оборудование (USB-шины, модули, интерфейс) для интегрирования в систему управления роботизированными системами (на-пример: «LK-Tech MF Shanghai Lingkong Technology Co., Ltd.»), но небольшую мощность до 0,54 кВт. Отсюда становится очевидным, что для достижения максимальных значений грузоподъемности экзоскелета на данный момент электропривод шарниров непригоден, необходим гидропривод как, например, у системы «XOS 2», рис. 4. Кстати есть простая возможность разгрузить приводы тазобедренного, коленного и голеностопного суставов путем использования противовеса, рис. 7в). Очевидно, что требуемый крутящий момент можно снизить на величину $P \times L_p$, где P – масса противовеса (рюкзака), L_p – расстояние от центра тяжести рюкзака до оси действия реакции опоры R_2 .

Приведем формулы для расчета максимальной грузоподъемности распорок. Так как распорки обладают существенной длиной (по отношению к ширине сечения) и сжаты в процессе эксплуатации, об их максимальной грузоподъемности можно судить по величине критической силы P_k по формуле Эйлера:

$$P_k = \pi^2 EJ / (L_s n)^2;$$

где E – модуль упругости; L_s – длина распорки; n – коэффициент приведения длины; J – момент инерции сечения распорки, в случае использования трубы, J можно определить по формуле:

$$J = 0,05 D_n^4 (1 - [(D_n - 2s)/D_n]^4).$$

Если стойка невысокая стоит проверить предел применимости формулы Эйлера по условию:

$$\lambda > \lambda_{np}; \quad (2)$$

где λ – гибкость опоры:

$$\lambda = L_s n / (J/S)^{0,5}.$$

Здесь S – площадь сечения опоры, в случае использования трубы:

$$S = 0,875 D_n^2 (1 - [(D_n - 2s)/D_n]^2).$$

λ_{np} – граничная гибкость опоры:

$$\lambda_{np} = (\pi^2 E / [\sigma])^{0,5}.$$

В случае нарушения неравенства (2) необходимо использовать справочные значения коэффициента продольного изгиба.

Зададимся исходными данными, используя доступные изделия: распорка (основная деталь) – труба $D_n = 0,048$ м (48 мм); $s = 0,002$ м (2 мм) из качественной стали $[\sigma] = 245 \times 10^6$ Па. Высота стойки $L_s = 2$ м. Коэффициент приведения длины (самый невыгодный) $n = 2$. Модуль упругости $E = 2 \times 10^{11}$ Па. Получим критическую силу (максимальную грузоподъемность стойки) = 9625 Н, что эквивалентно массе порядка 980 кг. Условие применимости формулы Эйлера (2): $\lambda = 243,4$; $\lambda_{np} = 89,8$; $\lambda > \lambda_{np}$, выполняется.

Сведем результаты анализа приспособлений и экзоскелетов в таблицу 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ характеристик экзоскелетных систем и приспособлений

№ п/п	Наименование показателя качества	Экзоскелет типа «ЕхoHeaver» промышленного образца, рис.3	Экзоскелет типа «XOS 2», военного образца, рис.4	Грузоподъемное приспособление «штабелёр», рис.5	Набор распорных конструкций с ручной талью, рис.6	Примечание, рейтинг
1	Максимальная грузоподъемность	60 кг	300 кг*	от 500 кг	от 500 кг	*предполагаемое значение, 3/2/1/1
2	Высота подъема	0 – 2 м	0 – 2 м	0 – 2,5 м	0 – 3 м	3/3/2/1
3	Возможность манипуляции с грузом на весу	есть	ограничена (только одной рукой)	нет (груз на подъемной опоре)	есть	1/2/3/1
4	Транспортировка грузов	ограничена (замедленная)	возможна	возможна	ограничена (в пределах длины кран-балки)	2/1/1/2
5	Проходимость	высокая	высокая	ограничена (по ровной поверхности)	нет (транспортировка по частям)	1/1/2/3
6	Компактность	высокая	высокая	невысокая	высокая (по частям)	1/1/2/1
7	Экономическая доступность	доступно для широкой продажи (от 1 020 000 руб.)	не доступно для продажи	доступно для широкой продажи (от 40 000 руб.)	доступно для широкой продажи (от 30 000 руб.)	3/4/2/1
8	Итоговый рейтинг					14/14/13/10

Главными критериями для характеристики данных устройств для использования в области логистики будем считать: максимальную (теоретическую) грузоподъемность;

максимальную высоту подъема; возможность манипуляции с грузом на весу; возможность транспортировки грузов; проходимость (возможность передвигаться по пересеченной местности); компактность; экономическую доступность (стоимость, наличие на рынке), табл.1.

По каждому показателю качества можно выстроить своеобразный рейтинг, распределяя призовые места среди перечисленных устройств. Итоговый рейтинг устройства получим арифметическим сложением всех мест – баллов. При этом чем меньше баллов, тем лучше результат. Ожидается, но согласно вышеприведенному рейтингу пока более привлекательными выглядят грузоподъемные приспособления, опережая экзоскелетные системы.

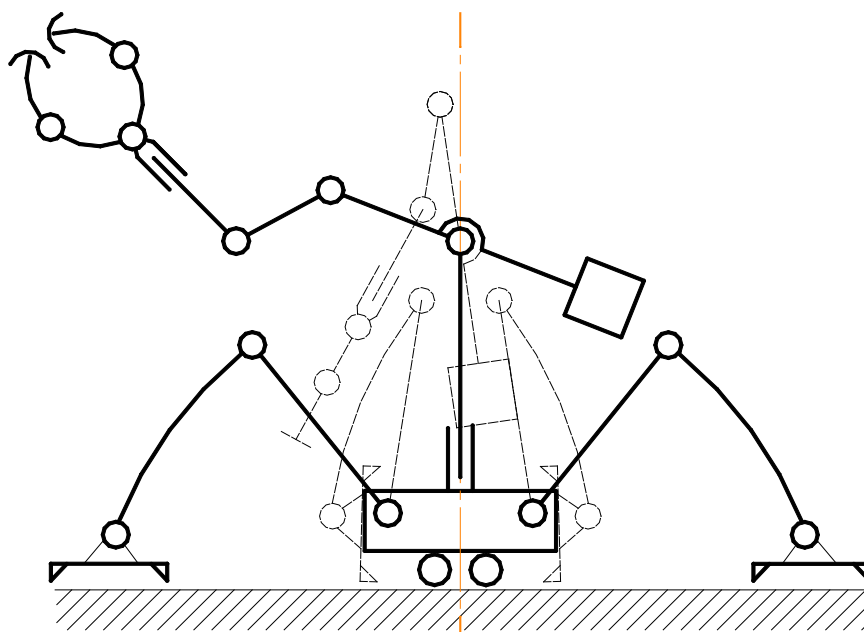


Рис.8 Схема роботизированного устройства для погрузочно-разгрузочных операций

В заключении можно представить предполагаемую схему идеального механизма для погрузочно-разгрузочных (логистических) операций, рис.8. Очевидно, это может быть роботизированный, многофункциональный манипулятор на паукообразной платформе. Платформа должна иметь возможность выставить надежные упоры и перемещаться через различные препятствия подобно пауку, сочетая колесный или гусеничный ход для эффективного перемещения в случае ровной поверхности. Целесообразно иметь целый набор многофункциональных захватов и инструментов для работы с различного типа грузами и изделиями. Для обеспечения высоких показателей по грузоподъемности необходим гидравлический привод. При этом центральный гидронасос может иметь и электропривод. Управление целесообразнее осуществлять через оператора (дроновода) посредством радиосвязи или по оптоволоконному кабелю.

Как справедливо отмечено авторами [14], активный экзоскелет с множеством приводов требует реализации несоизмеримого с назначением по сложности устройства. В силу необходимости включения в контур управления человека-оператора, обеспечения датчиками управления экзоскелета как робота и датчиками активности оператора, системами предсказания его намерений и обеспечения его безопасности комплекс оказывается более сложным, чем удаленно управляемый робот. Для обеспечения энергетической автономности экзоскелета со множеством приводов потребителей требуется включение в его состав массивного и габаритного источника энергии (аккумулятора, генератора, насоса), что также существенно ухудшает функциональность насоса [14]. Соответственно, идеальный грузоподъемный механизм не может быть экзоскелетом, рациональнее использовать отдельный, независимый агрегат.

В целом, очевидно, что грузоподъемные механизмы (ГПМ) далеко не исчерпали свой потенциал. На развивающихся производствах всегда будет существовать потребность в компактных, надежных ГПМ с высокими характеристиками. Поэтому в конструкторских бюро на машиностроительных предприятиях постоянно идет поиск оптимальных инженерных решений. Можно привести пример интересной конструкции крана-паука из Китая, рис.10. Кран-паук «Sagafirst EPFC3» при габаритных размерах $3,4 \times 0,95 \times 1,65$ м (проедет в большинство обычных дверей) имеет грузоподъемность до 3 т, максимальную высоту подъема 10 м. Некоторые другие интересные технические параметры крана-паука «Sagafirst EPFC3.0»: радиус действия – 9 м; длина стрелы – 2,8-8,2 м; угол наклона стрелы/время – 0-75°/135 секунд; угол поворота/скорость – 0-360 вращение без ограничений/60 секунд; скорость движения – 0-2,5 км/ч; силовой агрегат – электрический + дизельный, двойная мощность; максимальный подъемный момент – 1,0 т/м. Вес крана ≈ 2500 кг. Стоимость 5 190 000 руб.



Рис.9 Кран-паук «Sagafirst EPFC3» (Китай)

В сфере экзоскелетных технологий для нужд промышленности интересным выглядит направление развития: «экзоскелет в сочетании с приспособлением (манипулятором)». Собственно и модель «ExoHeaver Active Electric», рис.3, это сочетание экзоскелета и электрической лебедки для подъема грузов. Приведем пример подобной конструкции «ExoHeaver 3Handler», рис.10. Как справедливо заявляет производитель, он предназначен для облегчения физического труда работников промышленного производства. Его отличительная особенность – наличие “третьей руки” – механического модуля, используемого для крепления и удержания тяжелого инструмента, в том числе с возможностью виброзащиты. Справедливости ради, стоит упомянуть, что удержание действительно тяжелого инструмента на максимальном расстоянии потребует существенных усилий в голеностопном суставе для сохранения равновесия, см. рис.7, б). Правда, если использовать противовес, рис.7, в) изгибающий момент $M_{\text{и}}$ в стопе можно уменьшить.

В контексте использования грузоподъемных приспособлений полезно упомянуть действующие «Правила по охране труда при погрузочно-разгрузочных работах и размещении грузов» [15]: пункт правил (п.п.) 34. Производство погрузочно-разгрузочных работ допускается при соблюдении предельно допустимых норм разового подъема тяжестей (без перемещения): мужчинами – не более 50 кг; женщинами – не более 15 кг;

п.п. 35. Погрузка и разгрузка грузов массой от 50 кг до 500 кг должна производиться с применением грузоподъемного оборудования и устройств (тельферов, лебедок, талей, блоков). Погрузка и разгрузка грузов массой более 500 кг должна производиться с применением грузоподъемных машин.



Рис.10 Экзоскелет «ExoHeaver 3Handler»

Т.е. по действующим правилам, рассматривая экзоскелеты и вышеперечисленные приспособления как грузоподъемное оборудование есть ограничение по допустимой максимальной массе грузов с точки зрения охраны труда – до 500 кг.

Важным вопросом, связанным с дополнительными организационными издержками для промышленных предприятий является необходимость регистрации и учета ряда подъемных сооружений (ПС) в федеральных органах исполнительной власти. Согласно федеральным нормам и правилам (ФНП) [16] не подлежат учету в федеральных органах исполнительной власти в области промышленной безопасности, осуществляющих ведение реестра опасных производственных объектов (ОПО), или Госкорпорации "Росатом" следующие подъемные сооружения (ПС):

- б) краны стрелового типа грузоподъемностью до 1 т включительно;
- в) с ручным приводом, электро- и автопогрузчики;
- е) монтажные полиспасты и конструкции, к которым они подвешиваются (мачты, балки, шевры);
- з) домкраты;

и) манипуляторы, используемые в технологических процессах;

ж) электрические тали грузоподъемностью до 10 т включительно, используемые как самостоятельные ПС.

Т.е. кран-паук Sagafirst, рис. 9, грузоподъемностью 3 т (> 1 т), стрелового типа, требует регистрации и учета в федеральных органах исполнительной власти в области промышленной безопасности. Следовательно лучше использовать грузоподъемные механизмы типа рис. 8, 9 грузоподъемностью до 1 т.

Вообще, что касается вопросов нормативного регулирования в промышленности, все связанное с экзоскелетами, очевидно, должно выделяться отдельно. В России же пока, как и во многих других странах, соответствующая нормативно-техническая база отсутствует [17]. Авторы [16] считают, что экзоскелеты в промышленности должны прежде всего рассматриваться как средства индивидуальной защиты (СИЗ) опорно-двигательного аппарата (ОДА) работника от неблагоприятного воздействия тяжести трудового процесса.

В доказательство можно привести ряд статей по данной тематике, где авторы, действительно, делают наибольший акцент на использовании экзоскелетов именно как средства профилактики заболеваний органов ОДА на производствах, связанных со значительными физическими нагрузками [14, 18 – 20]. Поэтому вероятно, наиболее конкурентоспособным и популярным в настоящее время показал себя мягкий, пассивный экзоскелет, главная функция которого поддержка правильной осанки (ровной спины) за счет встроенных гибких элементов при выполнении физически тяжелых работ. Такие экзоскелеты меньше сковывают движения, хорошо подгоняются под размеры тела, могут размещаться под одеждой и не требуют источников питания (так, как нет активных приводов). К тому же их стоимость в 10 раз и более ниже по сравнению с активными. Такие экзоскелеты представлены моделями «ExoHeaver Lowebacker» [5], «X-Soft» от российской компании «Exorise» [18, 19], «SuitX» от компании «US Bionics, Inc.» [20] и т.д. Правда, сложно говорить о грузоподъемности экзоскелетов данного типа, т.к. в их конструкции отсутствует жесткая рама (см. рис.7) и активные приводы.

Как уже упомянуто ранее, главное преимущество экзоскелетных технологий было, есть и будет стремление копировать и дублировать двигательные функции человека. В этом качестве экзоскелетные технологии имеют наибольшие перспективы. Человеческий организм совершенен, но, к сожалению подвержен болезням и травмам. В качестве средства медицинской реабилитации экзоскелет имеет, очевидно, наилучшие перспективы. Использовать человеческий организм в качестве грузоподъемного средства и для перемещения тяжелых грузов не целесообразно в силу его анатомических особенностей. Следовательно использование антропоморфных роботов для данных целей также нецелесообразно. Здесь далеко не исчерпан ресурс различных специализированных механизмов и приспособлений. Идеальный грузоподъемный роботизированный механизм будет похож скорее на паука с манипулятором, рис.8. В целом можно сделать вывод, что для механизации труда в промышленности в первую очередь необходимо использовать более доступные приспособления. Использовать экзоскелет следует преимущественно по медицинским показаниям в качестве профилактики заболеваний ОДА или в качестве реабилитации при потере или снижении двигательных функций. В настоящее время для этого больше подходит экзоскелет мягкого, пассивного типа. В сфере охраны труда это направление по совершенствованию СИЗ при выполнении работ, связанных с тяжелыми физическими нагрузками.

Литература:

1. Экзоскелет. Википедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=67717712> (дата обращения: 14.02.2025).
2. Яцун С.Ф. и др. Создание научно-исследовательской лаборатории современных методов и робототехнических систем для улучшения среды обитания человека: Научно-технический отчет.

- ФГБОУ Юго-Западный государственный университет. Курск. 2014. 163 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53873762> (дата обращения: 25.02.2025).
3. Воронович Ю.В., Лавшук Д.А., Загrevский В.И. Биомеханика тяжелоатлетических упражнений: Монография. Могилевский институт МВД. Могилев. 2014. 196 с. URL: <https://elibrary.ru/xuwnhn> (дата обращения: 10.02.2025).
4. Российские экзоскелеты «ЕхоHeaver» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://top3dshop.ru/blog/Russian-exoskeletons-echoheaver-review.html#ekzoskelety-echoheaver> (дата обращения: 14.02.2025).
5. Яцун А.С., Постольный А.А., Савельева Е.В., Никулин Я.С. Опыт применения промышленных экзоскелетов на горнодобывающих предприятиях // Труды 32-й Международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». 2021. №1(32). С. 245–250. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47078634>.
6. Экзоскелет «XOS-2 Ratheon» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dzen.ru/a/W0YWYnU9zQCpIWcn?ysclid=m56izkl8fd839857307> (дата обращения: 14.02.2025).
7. Сиволобов С.В. Математическое моделирование походки человека на основе пятизвенной модели антропоморфного механизма с использованием методов оптимизации // Математическая физика и компьютерное моделирование. 2024. Т. 27. №1 С. 62–85. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-pohodki-cheloveka-na-osnove-pyatizvennoy-modeli-antropomorfного-mehanizma-s-ispolzovaniem-metodov?ysclid=m7d42cx4bi976417149> (дата обращения: 25.02.2025).
8. Cho J., Park J. H. Model Predictive Control of Running Biped Robot // Applied Sciences. 2022. V.12. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/app12211183> (дата обращения: 20.02.2025).
9. Zhang J., Sun Y., Jing Q., Lu Y., Mi N., Lian X., Dong Sh., Bian J. Walking Stability of Biped Robot Based on Machine Learning Algorithm // Recent Advances in Materials and Manufacturing Technology. Singapore: Springer. 2023. P. 635–644. URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-99-2921-4_58 (дата обращения: 20.02.2025).
10. Gorobtsov A. S., Skorikov A. V., Tarasov P. S., Andreev A. E. Parallel Computing Technologies in the Stability Problem of Humanoid Robot Dynamic Modes // Parallel Computational Technologies (PCT'2021). Chelyabinsk: South Ural State University Publ. 2021. P. 50–54.
11. Liu Ch., Audu M. L., Triolo R. J., Quinn R. D. Neural Networks Trained via Reinforcement Learning Stabilize Walking of a Three-Dimensional Biped Model with Exoskeleton Applications // Frontiers in Robotics and AI. 2021. Vol. 8. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2021.710999/full> (дата обращения: 20.02.2025).
12. Tianjin SS U Head Painted Heavy Duty Telescopic Adjustable Steel Post Jack Pole Prop [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.alibaba.com/product-detail/Tianjin-SS-U-Head-Painted-Heavy_60692178543.html (дата обращения: 24.02.2025).
13. Колесникова Г.П., Формальский А.М. Об одном способе моделирования походки человека // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. вып. 1. URL: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/1181.html> (дата обращения: 11.02.2025).
14. Барынкин И.С., Иванов А.А. Особенности конструкции экзоскелетов индустриального назначения // Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики. Санкт-Петербург. 2022. Т.10 №4. С. 304–308. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50044415>. (дата обращения: 14.02.2025).
15. Правила по охране труда при погрузочно-разгрузочных работах и размещении грузов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=386233&ysclid=m7eeopulwm280637682> (дата обращения: 14.02.2025).
16. Правила безопасности опасных производственных объектов на которых используются подъемные сооружения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=475870&ysclid=m7eevlgdce109482467> (дата обращения: 14.02.2025).
17. Бухтияров И.В., Герегей А.М., Ефимов А.Р., Костылева Е.В. Промышленные экзоскелеты как средства обеспечения промышленной безопасности. Нормативно-техническое регулирование // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 12. С. 53–57. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_44383763_97415139.pdf (дата обращения: 28.02.2025).
18. Гендлер С.Г., Туманов М.В., Прохорова Е.А., Шехманов В. Г. Оценка перспектив использования промышленных экзоскелетов для снижения тяжести труда в угольной

промышленности // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2021. Вып. 4. № 4. С. 209–222. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47498615>. (дата обращения: 14.02.2025).

19. Болонин Д.А., Майстренко Е.В. Внедрение экзоскелета при выполнении погрузочно-разгрузочных работ // Безопасный Север – чистая Арктика: V Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием: Сургут, СурГУ. 2023. С. 103–107. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54205639>. (дата обращения: 14.02.2025).

20. Очкина Н.А., Краюшкин С.А. Необходимость и перспективы применения экзоскелетов в строительстве // ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства». 2023. № 4. С. 193–198. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54619255>. (дата обращения: 14.02.2025).

A brief applicability analysis of up-to-date exoskeleton technologies in industry

Gorunovich S.B.^{a,b}

Ust-Ilimsk thermal power plant, “Baikal energy company”, Ust-Ilimsk, 666684, Russian Federation

^aGorunovich@baikalenergy.com, ^bGorunovichs@mail.ru

Keywords: exoskeleton, industry, heavy loads, application.

In this paper, we made a brief analysis of the exoskeletons in industry as means for lifting and moving heavy loads. Previously we had studied the human body physical features in case of the sport heavy weight lifting biomechanics. So we identified the necessary requirements and limits for the exoskeletons effective use in such operations. We made a review and analysis of up-to-date exoskeleton models from available advertising media sources. Then we studied the potential possibilities and exoskeleton design limits in terms of material resistance and theoretical mechanics. In particular, we calculated the theoretically maximum possible load capacity and the required exoskeleton joint drive power. A comparison was made with existing lifting devices with similar functions. A possible kinematic scheme of an ideal lifting mechanism was presented.

We came to the conclusion that before all exoskeleton technologies have the greatest potential in the rehabilitation for loss or decrease of human motor functions, as well as prevention of occupational musculoskeletal system diseases. So, first of all, it is important to expand the use of lifting devices, at the same time, to improve their design, combining anthropomorphic models and existing lifting devices advantages.

УДК 669.018

К вопросу о методах производства аморфных металлических материалов

Гиннэ С.В.^a

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, пр. им. газеты Красноярский рабочий 31, Красноярск, 660037, Россия

^asvetlanaginneh@rambler.ru

Ключевые слова: аморфные металлические материалы, методы производства аморфных металлических материалов.

В работе представлен информационно-аналитический обзор приоритетных научно-технических направлений в области создания аморфных металлических материалов. Разработана обобщённая система классификации современных методов производства аморфных металлических материалов, согласно которой все технологии получения и переработки обозначенных материалов можно разделить на три группы: 1) методы

газофазной аморфизации; 2) методы жидкофазной аморфизации; 3) методы твердофазной аморфизации. Выявлены перспективные методы производства аморфных металлических материалов на основе описания их фундаментальных специфик. Установлено, что: 1) среди методов газофазной аморфизации максимально продуктивным является ионно-плазменное распыление; 2) среди методов жидкофазной аморфизации наивысшим уровнем эффективности располагают закалка на диске, метод выстреливания, метод молота и наковальни; 3) среди методов твердофазной аморфизации наиболее результативными выступают методы механической обработки и металлизации.

В настоящее время происходит активное внедрение в производственную и научную практику аморфных металлических материалов (АММ), представляющих собой твёрдые неравновесные системы на основе металлов с неупорядоченным расположением атомов в пространстве, у которых отсутствуют кристаллические структурные единицы, присущие твёрдым поликристаллическим материалам. К аморфным металлическим материалам специалисты относят аморфные металлы и аморфные сплавы, называемые металлическими стёклами, так как они имеют внутреннее строение подобное структуре стекла, вследствие чего эти материалы обладают обширной совокупностью преимуществ над традиционными металлическими материалами с кристаллическим строением [1–11]. Тем не менее, в ходе промышленного использования АММ доказано, что их широкому распространению в индустриальной сфере препятствуют значительная себестоимость, относительно невысокая термическая устойчивость, неподатливость при комнатной температуре, недостаточная стабильность, невозможность создания крупногабаритных изделий и сварных конструкций. В этой связи возникает потребность нивелирования перечисленных недостатков АММ, которую можно удовлетворить путём модернизации современных способов получения и переработки данных материалов. Для решения обозначенной проблемы, по нашему мнению, необходимо определить перспективные технологии создания и обработки АММ, что является целью данной работы, для достижения которой: во-первых, разработали обобщённую систему классификации современных методов производства АММ; во-вторых, выявили и описали фундаментальные специфики (ключевые достоинства и недостатки) прогрессивных методов производства АММ.

Обращаясь к разработке обобщённой системы классификации современных способов получения и переработки АММ, необходимо заметить, что в зависимости от величины критической скорости охлаждения указанных материалов все методы их производства учёные разделяют на две группы:

- 1) технологии создания и обработки АММ посредством достижения больших критических скоростей охлаждения;
- 2) технологии создания и обработки АММ при сравнительно низких критических скоростях охлаждения.

При этом, исследователи подчёркивают, что по кинетическим причинам высокоскоростное охлаждение расплава или конденсата металлического материала препятствует образованию кристаллических зародышей, поэтому АММ во многом наследуют структуру жидкого состояния. Таким образом, согласно точки зрения некоторых экспертов, большинство современных способов получения и переработки АММ предполагает обеспечение быстрого перехода их компонентов из жидкого или газообразного состояний в твёрдое, характеризующееся отсутствием дальнего порядка в расположении частиц (атомов, ионов) [2]. Следовательно, методы производства АММ можно разделить на три группы (рис. 1): 1) методы газофазной аморфизации, то есть осаждение АММ из газовой фазы (закалка из газовой фазы); 2) методы жидкофазной аморфизации, то есть затвердевание АММ из жидкой фазы (закалка из жидкого состояния, высокоскоростная закалка расплава, спиннингование); 3) методы твердофазной аморфизации, то есть получение АММ в твёрдом состоянии (введение дефектов в металлический кристалл).

Как видно из рис. 1, наибольшее количество технологий создания и обработки АММ

включает в себя группа методов жидкофазной аморфизации, сущностную характеристику которых учёные представляют следующим образом:

- при сверхбыстром (сверхскоростном) охлаждении однородного расплава атомы не успевают переместиться на расстояние, позволяющее им образовать кристаллическую решётку;

- в результате фиксируется состояние пересыщенного твёрдого раствора с величинами растворимости компонентов в основе металлического материала, близкими или равными растворимости в расплаве;

- в большинстве случаев такое пересыщение в значительной степени превышает равновесную растворимость компонентов в основе металлического материала;

- в итоге у затвердевшего металлического материала формируется однородное и равномерное по всему объёму распределение компонентов [12–16].

В качестве ключевых особенностей методов жидкофазной аморфизации (затвердевания АММ из жидкой фазы) научно-технические работники указывают:

- их относительную простоту осуществления;

- потенциал обеспечения чрезвычайно высоких скоростей охлаждения (до $10^9 \dots 10^{10}$ К/с), обеспечивающих аморфизацию даже некоторых чистых элементов (например, Ge, Ni и других) с низким уровнем способности к формированию стекла или способности к аморфизации, обозначаемой в международной системе научных знаний GFA (glass forming ability) [3, 14–17].

Обращая внимание на методы газофазной аморфизации (осаждения АММ из газовой фазы), практикующие специалисты отмечают, что:

- атомы или ионы металлического материала, создаваемые термическим испарением, катодным распылением и другими способами, осаждаются в вакуумной камере на охлаждаемую до низких температур подложку;

- в результате образуется аморфный поверхностный слой или плёнка, загрязнённые атомами остаточных газов, неизбежно присутствующих в вакуумной камере [3].

Главными спецификами методов газофазной аморфизации исследователи называют возможность получения:

- тонких аморфных поверхностных слоёв или плёнок толщиной до (10 ... 100) нм (однако, использование скоростного плазменного осаждения позволяет увеличить толщину плёнки до нескольких миллиметров и повысить её чистоту);

- АММ в довольно широком диапазоне химических составов;

- в аморфном состоянии даже чистых металлов (Fe, Ni, Al, W и других) при использовании термического испарения [3].

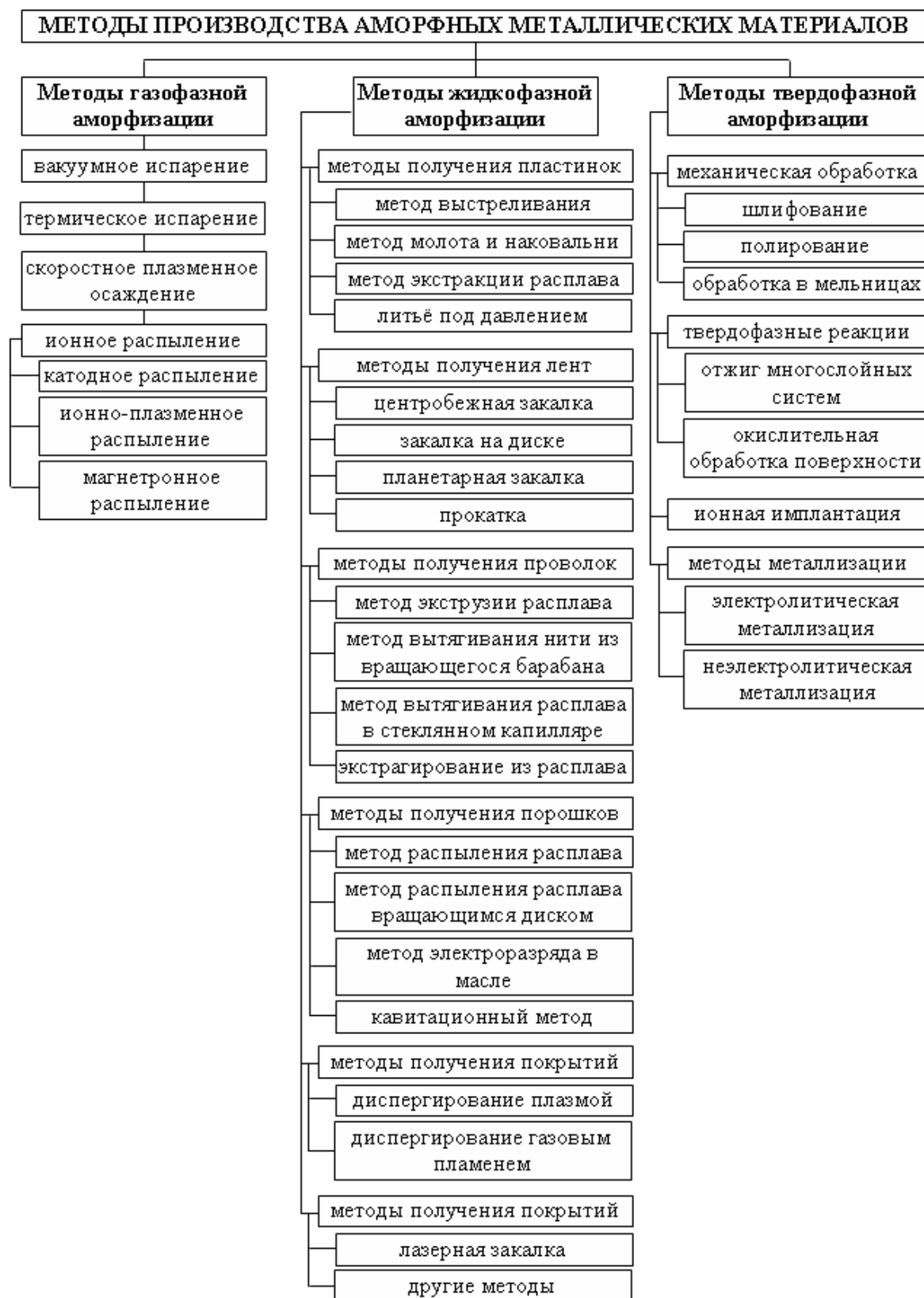


Рис. 1. Обобщённая система классификации методов производства АММ

Далее, согласно заявленной траектории исследования, предлагаем перейти к детальной характеристике наиболее продуктивных технологий создания и обработки АММ.

Среди нескольких десятков методов жидкофазной аморфизации (рис. 1) считаются высокоэффективными и по этой причине чаще всего используются на практике закалка на диске (рис. 2), метод выстреливания, метод молота и наковальни.

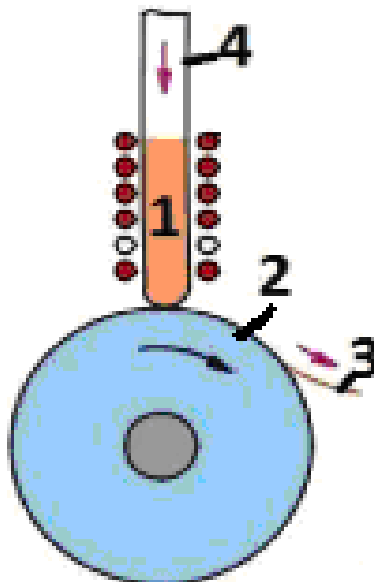


Рис. 2. Схематичное изображение устройства, реализующего закалку на диске [14]
1 – расплав; 2 – металлический диск (цилиндр, барабан); 3 – лента АММ; 4 – инжекционное сопло

Технология осуществления закалки на диске состоит в том, что:

- сначала струя расплава под небольшим давлением (0,2 атм) вытекает через инжекционное сопло, которое сделано из плавленого кварца или окиси алюминия;
- затем струя расплава попадает на поверхность быстро вращающегося охлаждаемого диска (цилиндра, барабана), обод которого изготавливается из материала, обладающего хорошей теплопроводностью;
- в результате расплав затвердевает в виде непрерывной ленты шириной от 1 до 80 и более мм и толщиной от 20 до 40 и более мкм [14].

Метод «выстреливания», технология исполнения которого сводится к выстреливанию струёй газа мелких капель расплава на охлаждаемую жидким азотом или гелием медную подложку с последующим формированием АММ в виде тончайшей фольги ($\sim 0,1 \dots 10$ мкм), был использован ещё П. Дувезом [3, 13, 18]. Технология метода молота и наковальни представляет собой расплющивание свободно падающей капли между двумя массивными медными поршнями (при этом фольга получается более однородной по толщине) [3].

Исходя из наличия большого комплекса преимуществ, ещё одним прогрессивным методом жидкофазной аморфизации можно назвать литьё под давлением, который отличается от других способов получения и переработки АММ этой группы тем, что:

- исходными компонентами для плавки могут быть более загрязненные примесями металлические материалы;
- перегрев расплава осуществляют на $(100 \dots 300)^\circ\text{C}$ выше температуры его кристаллизации;
- процесс литья осуществляется при остаточном давлении воздуха не более 10 Па и скорости охлаждения не менее $10^3^\circ\text{C}/\text{с}$;
- возможно изготовление режущего инструмента (к примеру, медицинского);
- особенностью получаемых АММ является сочетание низкого модуля Юнга от 70 до 90 ГПа с высокими значениями упругой деформации от 1 до 2 % [19].

Среди методов газофазной аморфизации максимальную результативность демонстрирует ионно-плазменное распыление, выполняемое в устройстве, основанном на четырех электродной схеме распыления (рис. 3), технология реализации которого заключается в следующем:

- вся система находится в вакуумной камере 1, содержащей газ аргон под давлением 0,5 Па;

- при нагреве вольфрамовой спирали 3 электрическим током эмитированные электроны перемещаются в сторону анода 2 под действием потенциала, создаваемого источником высокого напряжения (порядка 3 кВ);
- по пути электроны сталкиваются с атомами аргона и ионизируют их, в результате чего ионы аргона образуют плазму;
- после того, как «зажглась» плазма, к мишени 4 прикладывается отрицательный потенциал, при этом положительно заряженные ионы инертного газа из плазмы устремляются на мишень;
- ионы аргона, имея достаточно большую энергию, выбивают поверхностные атомы мишени, которые осаждаются на подложку 5;
- АММ получают в виде напылённого слоя 6 толщиной от 1 до 1000 мкм при скорости охлаждения порядка 10^{10} К/с [14, 20].

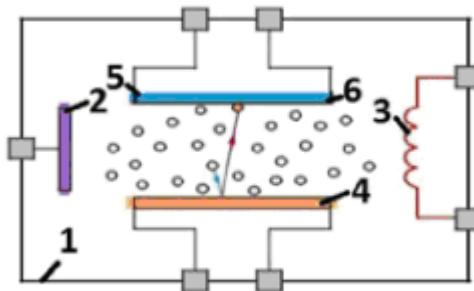


Рис. 3. Схематичное изображение устройства, реализующего ионно-плазменное распыление [14]

1 – вакуумная камера; 2 – анод; 3 – вольфрамовая спираль; 4 – мишень; 5 – подложка;
6 – напылённый слой АММ

В заключении считаем необходимым акцентировать внимание на том, что в текущий период времени АММ, как правило, получают в виде плёнки, ленты и проволоки, поэтому в качестве приоритетного направления развития технологий создания и обработки таких материалов можно рекомендовать разработку методов производства, позволяющих получать из них объёмные изделия больших размеров.

Литература:

1. Гиннэ С.В. К вопросу о современных аморфных металлических материалах // Механики XXI века: научно периодическое издание по материалам XXII Всероссийской научно-технической конференции «Механики XXI века». 2023. № 22. С. 272 – 278.
2. Сорокин В.С., Антипов Б.Л., Лазарева Н.П. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики. Санкт-Петербург, Москва, Краснодар, 2015. 448с.
3. Рябов А.В., Окишев К.Ю. Новые металлические материалы и способы их производства: учебное пособие. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. 64 с.
4. Гиннэ С.В. Аморфные металлические материалы: ключевые особенности и свойства / С.В. Гиннэ // Международный научно-практический журнал «Эпоха науки»: сетевое издание. 2023. № 34. С. 41 – 46.
5. Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. Аморфные металлические материалы // Силовая электроника. 2009. № 2. С. 86 – 89.
6. Чемакин И.А. Применение аморфных сплавов в машиностроительной отрасли. Оценка практического применения исследуемого материала // Национальная ассоциация ученых (НАУ). 2022. № 77. С. 52 – 54.
7. Болтынюк Е.В. Механическое поведение аморфных сплавов со структурой, модифицированной интенсивной пластической деформацией: автореферат дисс. на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук: 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела. СПб., 2018. 17 с.
8. Lu Z.P., Liu C.T. A new approach to understanding and measuring glass formation in bulk amorphous materials // Intermetallics. 2004. Vol. 12. Iss. 11. P. 1035 – 1043.

<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2004.04.032>.

9. Lu Z.P., Liu C.T. A new Glass-forming ability criterion for bulk metallic glasses // *Acta Materialia*. 2002. Vol. 50. Iss. 13. P. 3501 – 3512. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00166-0](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00166-0).
10. Ediger M.D., Angell C.A., Nagel S.R. Supercooled liquids and glasses // *Journal of Physical Chemistry*. 1996. Vol. 100. №. 31. P. 13200 – 13212.
11. Löffler J.F. Bulk metallic glasses // *Intermetallics*. 2003. Vol. 11. №. 6. P. 529 – 540.
12. Калинин Б.А., Федотов В.Т., Севрюков О.Н. Разработка и применение быстрозакаленных сплавов для пайки и плакирования конструктивных элементов атомной техники М., 2005. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru> (дата обращения 17.12.2024).
13. Кульков В.Г. Физика конденсированного состояния в электрохимическом материаловедении. СПб., 2022. 271 с.
14. Морозова А.Э., Рыжков Н.С. Аморфные ферромагнитные сплавы // *Материалы 73 студенческой научно-практической конференции*. 2017. С. 95 – 98.
15. Калинин Б.А., Федотов В.Т., Севрюков О.Н., Григорьев А.Е. Аморфные ленточные припои для высокотемпературной пайки. Опыт разработки технологии производства и применения / Б.А. Калинин, В.Т. Федотов, О.Н. Севрюков, А.Е. Григорьев // *Сварочное производство*. 1996. №1. С.15 – 19.
16. Севрюков О.Н., Воробьева Л.П., Евсеева И.А., Чеботников В.Н. Исследование влияния параметров закалки на геометрию и качество быстрозакаленной ленты из сплава на основе титана // *The volumes of section. "B" Rapidly solidified Materials of the 6th Non-Ferrous Metallurgical Symposium (11-13 October 1989 Balatonaliga, Hungary)*. 1989. Part I. P. 64 – 72.
17. Гиннэ С.В. Аморфные металлические материалы: закономерности и условия аморфизации // *Международный научно-практический журнал «Эпоха науки»: сетевое издание*. 2025. № 41. С. 25 – 32.
18. Стогней О.В. Физика аморфных металлических сплавов: учебное пособие. Воронеж, 2007. 138 с.
19. Коновалов И.И., Маслов А.А., Орлов В.К. Литой аморфный сплав и способ изготовления литых аморфных изделий из этого сплава // *Патент России № 2 064 020*. 1996.
20. Золотухин И.В. Аморфные металлические материалы // *Соросовский образовательный журнал*. 1997. № 4. С. 73 – 78.

TO THE QUESTION ABOUT PRODUCTION METHODS FOR AMORPHOUS METALLIC MATERIALS

Ginne S.V.^a

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, the ave. of the newspaper the Krasnoyarsk worker 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

^asvetlanaginneh@rambler.ru

Keywords: amorphous metallic materials, production methods for amorphous metallic materials.

An information and analytical review of priority scientific and technical directions in the field of creation of amorphous metallic materials is presented in the article. A generalized classification system of modern methods of production of amorphous metallic materials has been developed, according to which all technologies for the obtaining and processing of these materials can be divided into three groups: 1) methods of gas-phase amorphization; 2) methods of liquid-phase amorphization; 3) methods of solid-phase amorphization. Promising methods for the production of amorphous metallic materials have been identified based on a description of their fundamental specifics. It has been established that: 1) among the methods of gas-phase amorphization, the ion plasma sputtering is the most productive; 2) among the methods of liquid-phase amorphization, the hardening on a disk, the shooting method, the hammer and anvil method have the highest level of efficiency; 3) among the methods of solid-phase amorphization, the methods of mechanical processing and metallization are the most effective.

УДК 629.783

Расчет надежности платформы «Экспресс-1000»

Рожкова Е.А.^{1,a}, Кустов А.В.^{1,b}¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31^ae_rozhok@vk.com, ^balexkust@mail.ru

Ключевые слова: космический аппарат, надежность, система ориентации и стабилизации, вероятность безотказной работы, резервирование.

В статье рассматриваются вопросы обеспечения надёжности космических аппаратов с длительным сроком активного существования, в частности, анализ вероятности безотказной работы системы ориентации и стабилизации платформы «Экспресс-1000». Актуальность исследования обусловлена повышенными требованиями к надёжности бортовой аппаратуры КА и необходимостью адаптации существующих стандартов к длительным срокам эксплуатации в условиях космоса. Представлен анализ структуры КА, принципов нормирования надёжности, а также иерархической структуры платформы. На примере спутника «KazSat-3» рассмотрен сценарий вывода КА на геостационарную орбиту и проанализировано влияние различных режимов работы подсистем на общую надёжность. Разработана модель, позволяющая оценить ВБР СОС в двух режимах работы. Предложены методы повышения надёжности.

Введение. Срок активного существования (САС) космических аппаратов (КА), входящих в состав современных космических систем и комплексов — 10—15 лет. Это позволяет существенно сократить количество запусков КА для развертывания и поддержания орбитальных группировок.

Важным показателем надежности КА является безотказность функционирования. В рамках современных стандартов бортовая аппаратура (БА) для данных КА должна удовлетворять следующему требованию: «высокая надежность при минимальных массе, габаритах и стоимости». Отечественные стандарты, регламентирующие вопросы обеспечения надежности КА, и отчасти научная и производственная базы, в настоящее время слабо ориентированы на КА с САС, составляющим 10—15 лет. Поэтому разработка научно-технических основ, стандартизация передового опыта, обоснование новых и совершенствование действующей систем (и методов) обеспечения надежности БА на различных этапах жизненного цикла КА (проектирование, разработка рабочей документации, наземная отработка опытных образцов, летные испытания и эксплуатация) приобретают актуальное значение. [1]

Современные космические аппараты представляют собой сложные, наукоёмкие системы, функционирующие в экстремальных условиях космического пространства. Обеспечение бесперебойной работы КА на протяжении всего срока активного существования — критически важная задача, поскольку успех миссии и экономическая эффективность напрямую зависят от их надежности. В отличие от наземной техники, ремонт или обслуживание КА в космосе практически невозможны, что делает надежность главным критерием при разработке КА. Надежность определяется не только характеристиками входящих в него компонентов, но и взаимодействием подсистем в различных режимах работы. Кроме того, переход между режимами работы сопровождается изменениями нагрузок, температурных режимов и других факторов, что может существенно увеличивать вероятность отказов. Даже незначительный отказ в одной из подсистем может привести к серьезным последствиям, вплоть до полной потери аппарата провала всей космической миссии.

Платформа «Экспресс-1000» как комплексная система предъявляет повышенные требования к надежности и отказоустойчивости. Обеспечение бесперебойной работы и минимизация рисков сбоев являются первоочередными задачами при ее проектировании, внедрении и эксплуатации.

Краткие теоретические сведения. Космический аппарат является одним из технических средств, входящим в состав космического комплекса (КК) и предназначенным для функционирования в космическом пространстве с целью решения задач в соответствии с назначением КК системы. Следует отметить, что космический аппарат является основным элементом КК, поскольку выполняет целевую функцию. [2]

Космический аппарат состоит из модулей, бортовых систем, бортового оборудования и бортовой аппаратуры. На рисунке 1 показано конструктивное деление КА на базе платформы «Экспресс-1000». Космический аппарат на этой платформе представлен на рисунке 2.

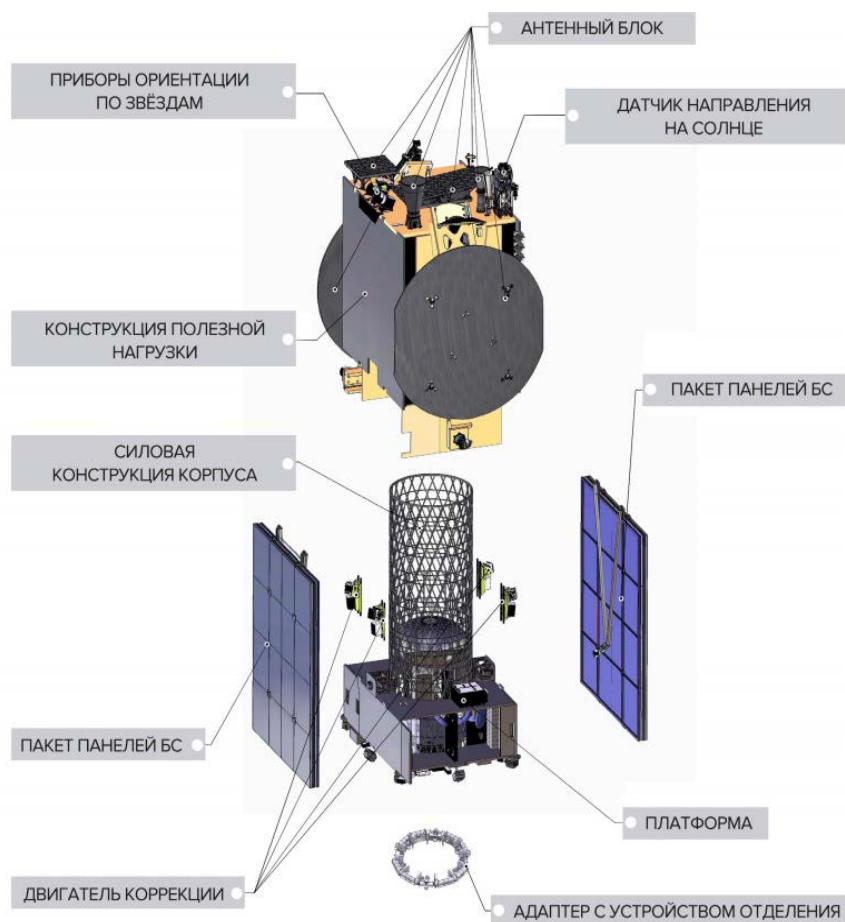


Рис. 1. Конструктивное деление космического аппарата на базе платформы «Экспресс-1000»

Конструкцию большинства современных и перспективных КА информационного обеспечения представляют в виде модуля полезной нагрузки (МПН) (модуля целевой аппаратуры) и модуля служебных систем (МСС) (космической платформы). Системы КА, входящие в состав МСС КА, являются обеспечивающими системами. Они предназначены для создания условий и реализации функций, обеспечивающих работоспособное состояние бортового оборудования.

Работы по обеспечению надежности аппаратов начинаются с задания требований к техническим характеристикам, в том числе по надежности, в техническом задании на их

разработку, для чего проводится нормирование надежности и распределение требований к надежности КА на его составные части. [3]

Надежность КА является комплексным, сложным свойством и состоит из сочетаний свойств безотказности, долговечности, сохраняемости, ремонтпригодности. Соответственно, предъявляются определенные требования к показателям, характеризующим какое-либо свойство надежности.

Оценка надёжности платформы «Экспресс-1000» предполагает комплексный анализ, учитывающий иерархическую структуру платформы и взаимодействие её подсистем. На первом этапе проводится анализ надёжности отдельных компонентов на основе статистических данных об их отказах и технических характеристиках, заявленных производителем. Особое внимание уделяется компонентам, работающим в критических режимах и подвергающимся воздействию повышенного уровня радиации и температурных колебаний, характерных для космического пространства. Например, будет проведён детальный анализ надёжности системы ориентации и стабилизации (СОС), включающий исследование датчиков, исполнительных механизмов и управляющей электроники. Далее с помощью методов логико-вероятностного моделирования, таких как анализ дерева отказов (FTA), оценивается влияние отказов отдельных компонентов СОС и других подсистем на функционирование всей платформы в целом.

В рамках данной работы будет разработана модель надёжности платформы «Экспресс-1000», учитывающая резервирование критически важных подсистем. Модель позволит оценить вероятность безотказной работы платформы на заданном интервале времени, среднее время наработки на отказ (MTBF) и коэффициент готовности. Будет проанализировано влияние различных стратегий резервирования, таких как холодное, горячее и параллельное резервирование, на общую надёжность системы, включая оценку эффективности резервирования в СОС. Результаты моделирования будут проверены путем сравнения с данными, полученными в ходе испытаний и эксплуатации аналогичных платформ.

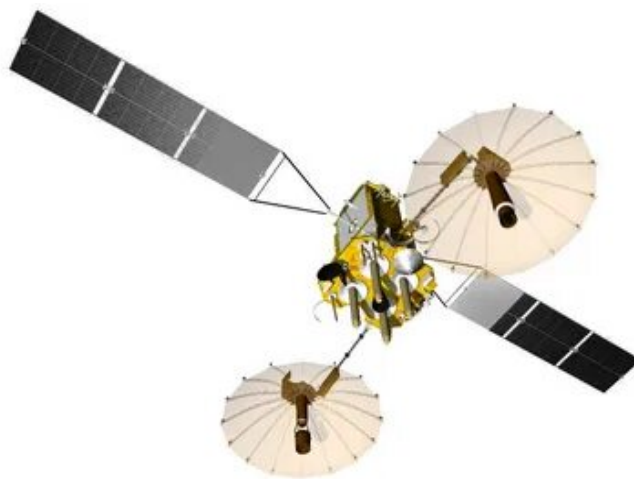


Рис. 2. Российский телекоммуникационный спутник-ретранслятор «Луч 5В»

Описание исследуемого космического аппарата. Работа посвящена исследованию влияния различных режимов работы подсистем на надёжность космического аппарата, прототипом которого является спутник «KazSat-3» (платформа «Экспресс-1000»). Рассматривается сценарий вывода КА на геостационарную орбиту с использованием ракеты-носителя «Протон-М» и разгонного блока «Бриз-М». Анализ проводится с учётом воздействия факторов, характерных для каждого режима работы. Результаты работы позволят оценить надёжность КА на различных этапах полёта и эксплуатации.

Таблица 1

Исходные данные о надежности подсистем космического аппарата

Тип КА	Тип 1
Назначение КА	Непрерывной ретрансляции
Тип орбиты	ГСО
САС	15
ВБР КА	0,8901
ССН	Последовательная
ВБР МПН	0,9652
ВБР БКУ	0,9688
ВБР СОС	-
ВБР СЭП	0,9869
ВБР СК	0,9988
ВБР СТР	0,9844
ВБР МУ	-
ВБР Конструкция	1
ВБР БКС	0,9932
Тип анализируемой подсистемы	СОС

Таблица 2

Сведения о вероятности безотказной работы приборов системы ориентации и стабилизации

Тип подсистемы	Приборный состав	Общее количество приборов	Количество функционирующих приборов		ВБР одного элемента
			Режим 1	Режим 2	
СОС	ПЗВ	2	2	2	0,9853
	ДНС	1	1	1	0,9987
	БII	1	2	1	0,9883
	ЭМИО	1	1	1	0,9887
	ПБС	1	1	1	0,9386
	ПО СОС	1	1	1	1
	ЭМИО	1	1	1	0,9935
	Виды проектируемых приборов				ДНС ПЗВ

Сокращения, принятые в таблицах 1 и 2: ГСО – геостационарная орбита, ВБР – вероятность безотказной работы, ССН – структурная схема надежности, БКУ – бортовой комплекс управления, СЭП – система электропитания, СК – система коррекции, СТР – система терморегулирования, МУ – механическое устройство, БКС – бортовой комплекс, ПЗВ – звездный прибор, ДНС – датчик направления на Солнце, БII – блок измерительный инерциальный, ЭМИО – электромеханический исполнительный орган, ПО – программное обеспечение.

По таблице 1 можно сделать вывод, что задачей работы будет расчет требуемой вероятности безотказной работы системы ориентации и стабилизации в двух режимах работы.

Определение требуемой вероятности безотказной работы системы ориентации и стабилизации. Космический аппарат считается работоспособным с момента его запуска и начала функционирования по предназначению до момента возникновения отказа любой из бортовых систем. В этом контексте под отказом бортовой системы понимается любое нарушение его работы, которое приводит к невыполнению поставленных перед аппаратом задач.

Предполагается, что отказы бортовых систем рассматриваются как независимые события, возможность которых должна учитываться при проектировании и эксплуатации космического аппарата.

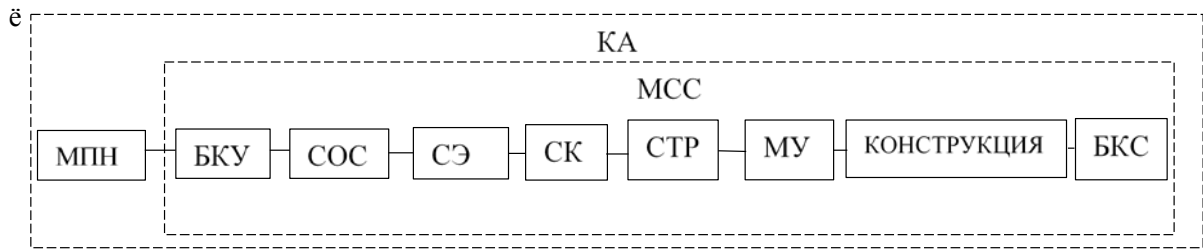


Рис. 3. Структурная схема надежности космического аппарата.

В соответствии с приведенной структурной схемой надежности (рис. 3), расчет ВБР КА осуществляется по формуле (1).

$$P_{КА} = P_{МПН} \cdot P_{МСС}, \quad (1)$$

где $P_{МСС} = P_{БКУ} \cdot P_{СОС} \cdot P_{СЭП} \cdot P_{СК} \cdot P_{СТР} \cdot P_{МУ} \cdot P_{К} \cdot P_{БКС}$

Подставляем $P_{МСС}$ в формулу (1), получим:

$$P_{КА} = P_{МПН} \cdot P_{БКУ} \cdot P_{СОС} \cdot P_{СЭП} \cdot P_{СК} \cdot P_{СТР} \cdot P_{МУ} \cdot P_{К} \cdot P_{БКС} \quad (2)$$

Определим требуемое значение ВБР СОС по полученной формуле (2). Для этого запишем выражение для определения ВБР КА и выразим из него ВБР СОС:

$$P_{СОС} = \frac{P_{КА}}{P_{МПН} \cdot P_{БКУ} \cdot P_{СЭП} \cdot P_{СК} \cdot P_{СТР} \cdot P_{МУ} \cdot P_{К} \cdot P_{БКС}} \quad (3)$$

В соответствии с таблицей 1 подставим необходимые значения в формулу (3):

$$P_{СОС} = y = \frac{0,8901}{0,9652 \cdot 0,9688 \cdot 0,9988 \cdot 0,9869 \cdot 0,9844 \cdot x \cdot 1 \cdot 0,9932'}$$

$$P_{СОС} = \frac{0,9865}{x}, \text{ где } P_{МУ} = x.$$

Зависимость ВБР СОС от ВБР МУ: $y = \frac{0,9865}{x}$.

ВБР системы или подсистемы не может быть больше 1, поэтому получим график значений (рис. 4), полученный с помощью программы Maple.

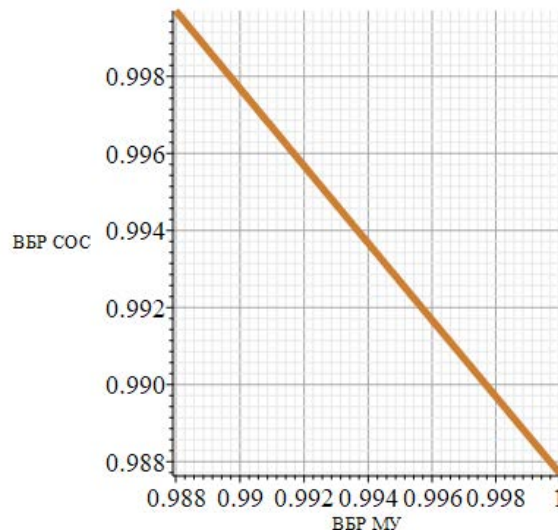


Рисунок 4. График возможных значений $P_{СОС}$ и $P_{МУ}$.

Таким образом мы получаем область допустимых значений:

$$P_{СОС} \in [0,9865; 1], P_{МУ} \in [0,9865; 1]$$

Примем минимальное значение $P_{СОС} = 0,9865$, тогда $P_{МУ} = 1$. Результат расчета приведен в таблице 3.

Далее рассчитаем ВБР СОС значения с помощью заданных ССН. Данные значения должны соответствовать диапазону ВБР СОС $\in [0,9865; 1]$.

Таблица 3

Результаты расчета требуемого значения вероятности безотказной работы системы ориентации и стабилизации

Наименование		Значение
ВБР КА	0,8901	ВБР КА
ССН	Последовательная	ССН
ВБР МПН	0,9652	ВБР МПН
ВБР МСС	БКУ	0,9688
	СОС	0,9865
	СЭП	0,9869
	СК	0,9988
	СТР	0,9844
	МУ	1
	Конструкция	1
	БКС	0,9932

Расчет ВБР СОС для режима работы № 1. Согласно структурной схеме надежности для режима работы № 1 (рис. 5), найдем ВБР СОС по формуле (4).

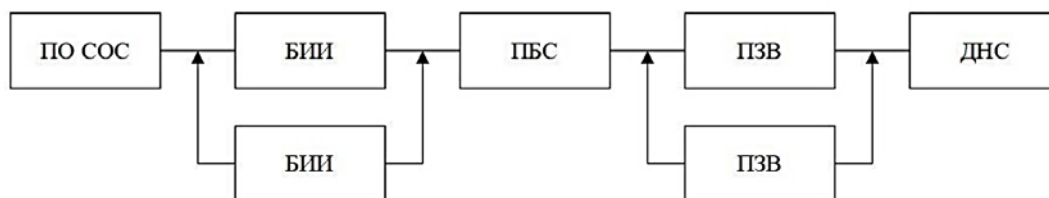


Рисунок 5. Структурная схема надежности для режима работы № 1.

$$P_{\text{СОС}} = P_{\text{ПО СОС}} \cdot P_{\text{БИИ}} \cdot (1 - \ln P_{\text{БИИ}}) \cdot P_{\text{ПБС}} \cdot P_{\text{ПЗВ}} \cdot (1 - \ln P_{\text{ПЗВ}}) \cdot P_{\text{ДНС}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{ПО СОС}}$ - ВБР ПО СОС; $P_{\text{ПЗВ}}$ - ВБР ПЗВ; $P_{\text{БИИ}}$ - ВБР БИИ; $P_{\text{ДНС}}$ - ВБР БИИ; $P_{\text{ПБС}}$ - ВБР ПБС.

$$P_{\text{СОС}} = 1 \cdot 0,9883 \cdot (1 - \ln(0,9883)) \cdot 0,9386 \cdot 0,9853 \cdot (1 - \ln(0,9853)) \cdot 0,9987 = 0,9363$$

Полученное значение $P_{\text{СОС}}$ не удовлетворяет диапазону $[0,9865; 1]$, значит необходимо провести расчет ВБР СОС исходя из требований надежности КА.

Расчет ВБР СОС для режима работы № 2. Согласно структурной схеме надежности для режима работы № 2 (рис. 6), ВБР СОС находится по формуле (5).

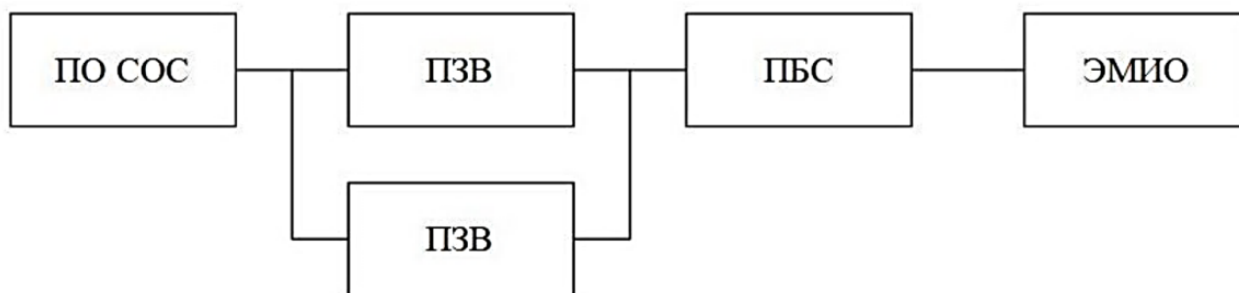


Рис. 6. Структурная схема надежности для режима работы № 2.

$$P_{\text{СОС}} = P_{\text{ПО СОС}} \cdot (1 - (1 - P_{\text{ПЗВ}})^2) \cdot P_{\text{ПБС}} \cdot P_{\text{ЭМИО}}, \quad (5)$$

где $P_{\text{ПО СОС}}$ - ВБР ПО СОС, $P_{\text{ПЗВ}}$ - ВБР ПЗВ, $P_{\text{ЭМИО}}$ - ВБР ЭМИО, $P_{\text{ПБС}}$ - ВБР ПБС.

$$P_{\text{СОС}} = 1 \cdot (1 - (1 - 0,9853)^2) \cdot 0,9386 \cdot 0,9935 = 0,9323$$

Полученное значение $P_{\text{СОС}}$ не удовлетворяет заданному диапазону $[0,9865; 1]$.

Результаты расчёта ВБР СОС для двух режимов работы сведены в таблицу 4.

Таблица 4

Результаты расчёта ВБР СОС для режимов работы № 1 и 2

Приборный состав подсистемы	ВБР прибора	Количество	
		ССН1 (режим работы № 1)	ССН2 (режим работы № 2)
ПЗВ	0,9853	2	2
ДНС	0,9987	1	1
БИН	0,9883	2	1
ЭМИО	0,9887	1	1
ПБС	0,9386	1	1
ПО СОС	1	1	1
ЭМИО	0,9935	1	1
ВБР СОС		0,9363	0,9323

Анализ полученных данных по вероятности безотказной работы системы ориентации и стабилизации в первом и втором режимах работы выявил существенно заниженные показатели по сравнению с требуемыми значениями.

Требуемая ВБР СОС составляет $[0,9865; 1]$, однако анализ показал, что фактическая ВБР не соответствует этим требованиям в двух основных режимах работы. В первом режиме, предполагающем ориентацию на Солнце, используется схема с частичным резервированием БИН и ПЗВ, что несколько повышает надёжность, но не обеспечивает требуемый уровень. Во втором режиме, например, при ориентации на Землю, схема проще и не имеет резервирования, что делает систему более уязвимой к отказам.

Низкая ВБР обусловлена несколькими факторами: относительно низкой надёжностью отдельных приборов, таких как ДНС и ПЗВ, наличием последовательных связей в структурной схеме, приводящих к каскадным отказам, и недостаточным уровнем резервирования.

Для повышения ВБР рассматривались различные варианты, в том числе снижение требований к ВБР космического аппарата, расширение испытаний, повышение ВБР модуля полезной нагрузки и других подсистем служебного модуля, резервирование, замена приборов на более надёжные аналоги и изменение структурной схемы СОС.

Однако в связи с невозможностью изменить структурную схему МПН и других подсистем МСС остаются три основных метода повышения ВБР СОС: резервирование критически важных компонентов, замена ненадёжных компонентов (ДНС и ПЗВ) на более надёжные аналоги и проведение дополнительных, более масштабных испытаний для уточнения ВБР и подтверждения эффективности изменений.

Выбор оптимального решения потребует анализа стоимости, технической осуществимости и влияния на другие подсистемы, включая количественную оценку эффективности каждого метода с использованием моделей и расчётов ВБР.

Пути повышения надёжности СОС. Для достижения требуемых значений вероятности безотказной работы (ВБР) системы ориентации и стабилизации (СОС) необходимо рассмотреть комплекс мер, направленных на повышение надёжности как отдельных компонентов, так и системы в целом. Основные направления включают:

1. Корректировка компонентов системы: анализ и оптимизация параметров отдельных элементов СОС с целью повышения их устойчивости к воздействию факторов космического пространства (перепадам температур, радиации, вакууму).

2. Резервирование: внедрение резервных элементов и подсистем для обеспечения отказоустойчивости. Необходимо рассмотреть различные стратегии резервирования (холодное, горячее, параллельное) и выбрать оптимальный вариант, исходя из требований к надёжности, массогабаритных характеристик и энергопотребления.

3. Замена ЭРИ на более качественные: применение электрорадиоизделий (ЭРИ) повышенной надёжности и устойчивости к воздействию космической среды. Это включает в себя отбор ЭРИ, прошедших дополнительные испытания и контроль качества.

4. Увеличение количества испытаний ЭРИ: проведение дополнительных испытаний ЭРИ на соответствие требованиям надежности, в том числе испытаний на воздействие радиации, температуры и вакуума.

5. Замена материалов комплектующих: использование более качественных и устойчивых к воздействию космического пространства материалов для изготовления комплектующих приборов.

6. Ужесточение входного контроля комплектующих изделий: проверка качества и соответствия комплектующих изделий требованиям надежности.

7. Реализация этих мер позволит повысить ВБР СОС до уровня, соответствующего заданным параметрам и требованиям системы, что обеспечит надежное функционирование космического аппарата в течение всего срока активного существования.

Заключение. В рамках проведенного исследования был выполнен анализ надёжности системы ориентации и стабилизации космического аппарата на базе платформы «Экспресс-1000». Установлено, что фактическая вероятность безотказной работы СОС в рассмотренных режимах работы не соответствует требуемым значениям, что обусловлено недостаточной надёжностью отдельных компонентов и отсутствием оптимального резервирования. Предложены возможные пути повышения надёжности СОС, включая применение более надёжных компонентов, внедрение резервирования критически важных элементов и проведение расширенных испытаний для уточнения характеристик надёжности.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на количественную оценку эффективности каждого из предложенных методов с учётом их стоимости, технической осуществимости и влияния на общую надёжность космического аппарата. Важным этапом является разработка комплексной модели надёжности, учитывающей взаимодействие всех подсистем КА и позволяющей оптимизировать структуру СОС с целью достижения требуемого уровня безотказности при минимальных затратах. Результаты данной работы могут быть использованы при проектировании и эксплуатации космических аппаратов с длительным сроком активного существования, а также для разработки новых стандартов и методов обеспечения надёжности бортовой аппаратуры. Необходимо учитывать, что обеспечение высокой надёжности — это комплексная задача, требующая системного подхода и постоянного совершенствования методов анализа и проектирования.

Литература:

1. Патраев В. Е., Максимов Ю. В. Методы обеспечения надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов длительного функционирования // Приборостроение. 2008. №8.
2. Надежность космических аппаратов информационного обеспечения: учеб. пособие / В. Е. Патраев, В. И. Халиманович; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2016. – 208 с.
3. Шангина Е.А. Надежность и техническая диагностика радиоэлектронных систем космических аппаратов. в: учеб. пособие / Е. А. Шангина, В. А. Комаров. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2022. – 92 с.

Reliability calculation of the Express-1000 platform

Rozhkova E.A.^{1,a}, Kustov A.V.^{1,b}

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Russian Federation, 660037, Krasnoyarsk, Krasnoyarsky Rabochy Av., 31

^a e_rozhok@vk.com, ^b alexkust@mail.ru

Key words: spacecraft, reliability, orientation and stabilization system, probability of failure-free operation, redundancy.

The article considers the issues of ensuring the reliability of spacecraft with a long period of active existence, in particular, the analysis of the probability of failure-free operation of the orientation and stabilization system of the Express-1000 platform. The relevance of the study is due

to increased requirements for the reliability of the onboard equipment of the spacecraft and the need to adapt existing standards to long-term operation in space conditions. The analysis of the spacecraft structure, the principles of reliability standardization, and the hierarchical structure of the platform are presented. Using the example of the KazSat-3 satellite, a scenario for launching the spacecraft into geostationary orbit is considered and the influence of various operating modes of the subsystems on the overall reliability is analyzed. A model has been developed that allows estimating the SOS PBR in two operating modes. Methods for increasing reliability are proposed.

УДК 629.78

Применение композиционных материалов с памятью формы в приводах развёртывания космических конструкций

Рожкова Е.А.^{1,a}, Кустов А.В.^{1,b}

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

^ae_rozhok@vk.com, ^balexkust@mail.ru

Ключевые слова: композиционные материалы с памятью формы, приводы развёртывания, космические конструкции, развёртываемые структуры.

В статье рассматривается применение композиционных материалов с памятью формы в приводах развёртывания космических конструкций, обусловленное потребностью в эффективных системах для крупногабаритных космических аппаратов. Представлен обзор традиционных методов развёртывания и обоснован потенциал КМПФ как альтернативного решения. Описаны основные характеристики, различные концепции приводов на основе КМПФ (балки, трубы, пружины, комбинированные) и проанализированы их преимущества и недостатки.

Введение. Развитие космической отрасли характеризуется растущей потребностью в крупногабаритных развёртываемых конструкциях, таких как антенны для спутниковой связи, солнечные панели для энергоснабжения и фермы для поддержки научных инструментов. Эффективное развёртывание этих конструкций в космосе представляет собой сложную инженерную задачу, требующую надёжных и лёгких приводных систем.

Существующие решения, в основном основанные на пружинах, шарнирах и тросах, часто оказываются недостаточно эффективными с точки зрения массогабаритных характеристик, надёжности и сложности управления. Большое количество подвижных элементов повышает риск отказов в условиях космической среды. Кроме того, точность и плавность развёртывания, обеспечиваемые традиционными системами, не всегда соответствуют современным требованиям к космическим аппаратам. В связи с этим перспективным направлением представляется использование композиционных материалов с памятью формы (КМПФ).

КМПФ обладают уникальным сочетанием свойств, позволяющих создавать компактные, лёгкие и надёжные приводы, способные к контролируемому и плавному развёртыванию. В настоящей работе рассматриваются возможности применения КМПФ в приводах развёртывания космических конструкций, анализируются их преимущества и ограничения, а также обсуждаются направления дальнейших исследований и разработок в этой области.

Краткие теоретические сведения. Материалы с памятью формы (МПФ) представляют собой класс материалов, способных обратимо изменять свою форму под воздействием внешних стимулов. В контексте развёртываемых космических конструкций

полимеры с памятью формы (ППФ) обладают рядом преимуществ, включая малый вес, технологичность и возможность интеграции функций материала, накопителя энергии и привода. Функционирование ППФ основано на наличии эластомерной и стеклообразной фаз, образующих сшитую структуру. Основная форма запоминается в виде сетки связей в стеклообразной фазе, а энергия, необходимая для восстановления формы, накапливается в виде напряжений в эластомерных сегментах полимера. Восстановление формы происходит при «размораживании» подвижностей стеклообразной фазы. Полимерные материалы с памятью формы являются очень привлекательными материалами для создания конструкций, способных самостоятельно разворачиваться из компактной транспортируемой формы [1].

Для космических применений важны высокие физико-механические показатели ПМПФ, а также их устойчивость к воздействию космической среды. Примерами ПМПФ, рассматриваемых для использования в космосе, являются полиуретаны, эпоксидные смолы, полинонборнены и акриловые полимеры.

Композиционные материалы с памятью формы сочетают в себе свойства ПМФ с преимуществами композиционных материалов, позволяя создавать приводы развёртывания с улучшенными механическими характеристиками и возможностью тонкой настройки свойств. В качестве матрицы в КМПФ часто используют эпоксидные смолы и другие полимеры, обладающие хорошей технологичностью, низкой плотностью и устойчивостью к воздействию космической среды. Для повышения прочности и жёсткости КМПФ применяют различные наполнители, в том числе углеродные волокна. Прилагаются значительные усилия для разработки углеродных композиционных материалов с эффектом памяти формы, что позволяет создавать изделия с высокими конструкционными характеристиками.

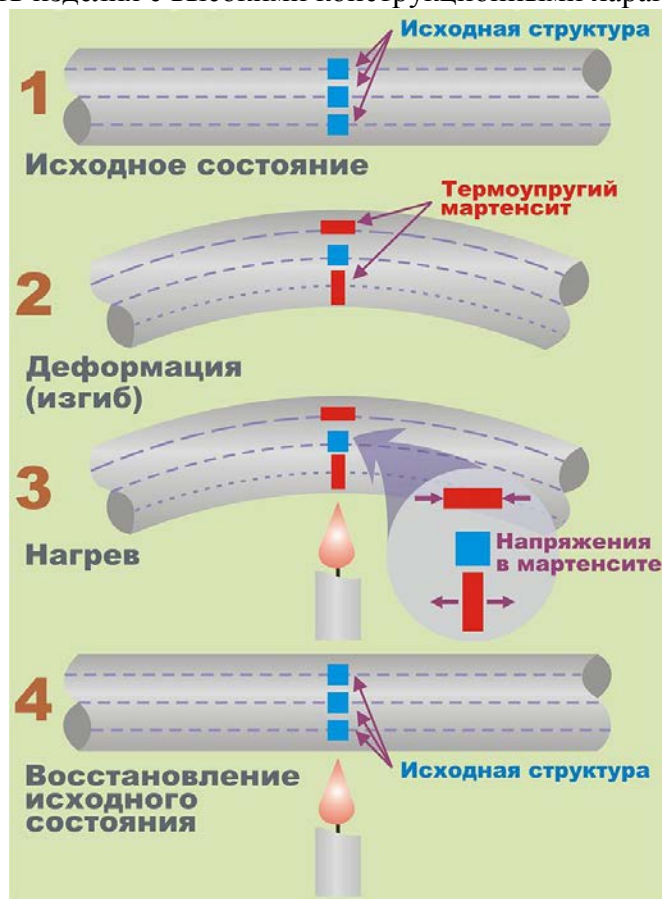


Рис. 1. Суть эффекта памяти форм

Полимерные материалы, обладающие памятью формы, являются очень привлекательными материалами для создания конструкций, способных самостоятельно разворачиваться из компактной транспортабельной формы. Основой функционирования таких полимерных материалов является наличие эластомерной и стеклуемой фаз,

образующих шитую структуру. Причём основная форма запоминается в виде сетки связей в стеклуемой фазе, а энергия, необходимая для восстановления формы, накапливается в виде напряжений в эластомерных сегментах полимера. [2]

Применение КМПФ в приводах. Композиционные материалы с памятью формы открывают новые возможности для решения этой задачи благодаря сочетанию малого веса, компактности в сложенном состоянии и способности к автономному развёртыванию. Существует несколько концепций приводов на основе КМПФ, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки.

1. Приводы на основе изгибающихся балок и пластин: в этой конструкции элементы из КМПФ, выполненные в форме балок или пластин, деформируются в сложенном состоянии. При нагревании, благодаря эффекту памяти формы, они стремятся вернуться к своей исходной форме, создавая усилие, необходимое для разворачивания конструкции.

Преимущества:

- Простота конструкции и изготовления.
- Возможность создания различных кинематических схем развёртывания.
- Небольшое количество подвижных элементов, что повышает надёжность.
- Хорошо подходят для развёртывания легких конструкций с небольшими требованиями к усилию.

Недостатки:

- Ограничены небольшими нагрузками и деформациями.
- Необходимость обеспечения равномерного нагрева по всей длине балки или пластины.
- Чувствительность к изменениям температуры окружающей среды.
- Ограниченная точность позиционирования развернутой конструкции.

2. Приводы на основе трубчатых элементов: трубчатые элементы из КМПФ могут быть скручены или растянуты в сложенном состоянии. При нагревании они раскручиваются или сжимаются, обеспечивая развёртывание конструкции.

Преимущества:

- Возможность создания больших усилий и перемещений.
- Компактность в сложенном состоянии.
- Относительно простая конструкция.
- Хорошо подходят для развёртывания крупногабаритных антенн и солнечных батарей.

Недостатки:

- Сложность изготовления трубчатых элементов с заданными характеристиками.
- Необходимость точного контроля температуры для обеспечения правильного развёртывания.
- Возможность потери устойчивости при больших деформациях.
- Требуется разработка надёжной системы фиксации в развернутом состоянии.

3. Приводы на основе пружинных элементов: в данном случае пружины из КМПФ используются в качестве элемента, накапливающего энергию для развёртывания. При нагревании пружина возвращается к своей исходной форме, обеспечивая развёртывание конструкции.

Преимущества:

- Высокая надёжность и долговечность.
- Простота конструкции.
- Возможность хранения энергии в течение длительного времени.
- Хорошо подходят для развёртывания конструкций с небольшим количеством элементов.

Недостатки:

- Ограниченные возможности по управлению процессом развёртывания.
- Сложность точного прогнозирования усилия развёртывания.

- Ограниченные возможности по созданию сложных кинематических схем.
- Необходимость защиты от случайного нагрева.

4. Комбинированные приводы: для достижения оптимальных характеристик часто используются комбинированные приводы, сочетающие в себе различные элементы КМПФ. Например, можно использовать изгибающиеся балки для создания начального усилия развертывания и трубчатые элементы для обеспечения дальнейшего перемещения.

Преимущества:

- Возможность оптимизации характеристик привода под конкретные требования.
- Повышенная надежность за счет дублирования функций.
- Более гибкое управление процессом развертывания.

Недостатки:

- Более сложная конструкция и изготовление.
- Необходимость точной координации работы различных элементов.
- Повышенная стоимость разработки и производства.

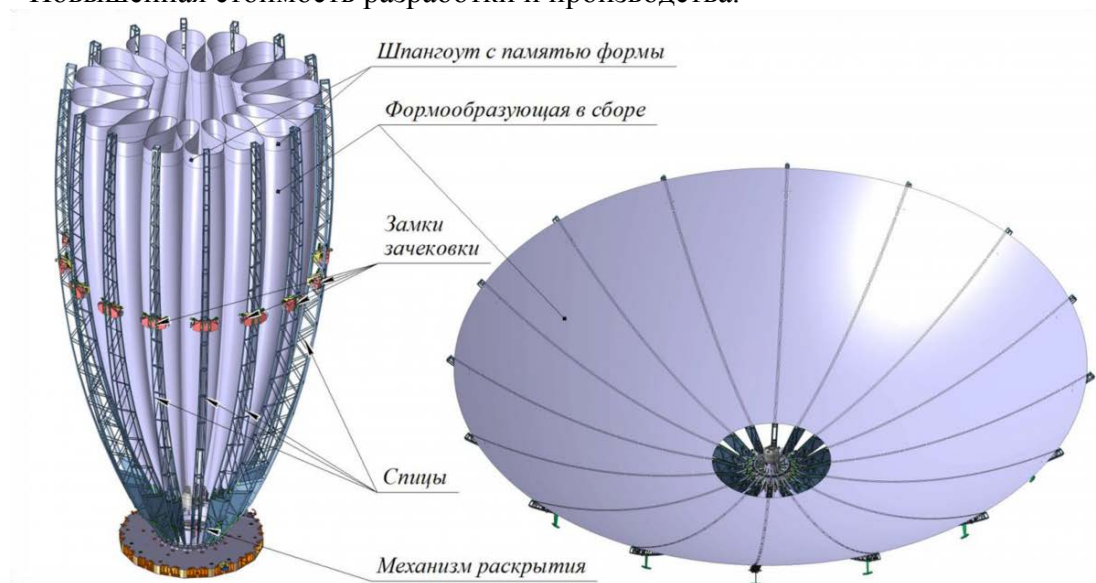


Рис. 2. Трансформируемый прецизионный крупногабаритный рефлектор космической антенны

Применение КМПФ в приводах развертывания позволяет значительно уменьшить массу и габариты системы, упростить конструкцию и повысить надежность. Однако, существуют и определенные вызовы, связанные с использованием КМПФ в космических условиях. К ним относятся обеспечение стабильности характеристик при длительном воздействии вакуума, радиации и перепадов температур, а также разработка эффективных методов нагрева и управления процессом развертывания. Важным аспектом является также разработка надежных систем фиксации развернутой конструкции, способных выдерживать нагрузки, возникающие в процессе эксплуатации.



Рис. 3. Самораскрывающаяся петля из композита с памятью формы

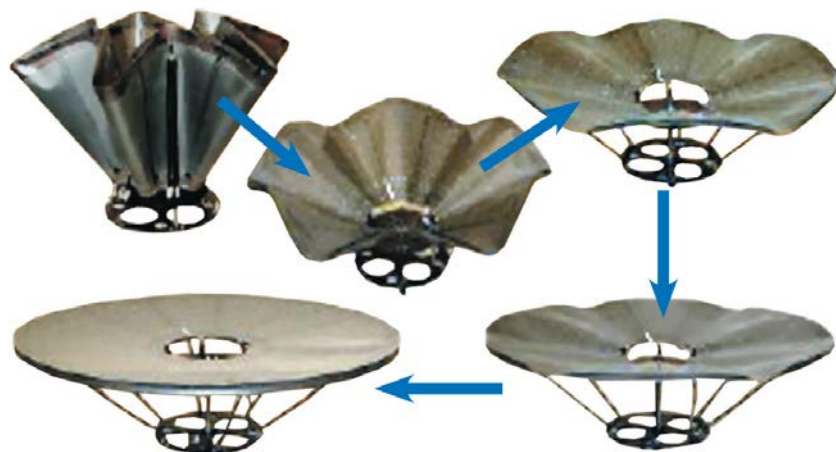


Рис. 4. Саморазворачивающиеся изделия с интегрированными плёночными нагревателями из углепластиков с эффектом памяти форм

Математическое моделирование и экспериментальные исследования.

Существующие модели поведения КМПФ можно разделить на две основные категории: феноменологические и микромеханические. Феноменологические модели, как правило, описывают поведение материала на макроуровне, используя термодинамические принципы и не принимая во внимание детали микроструктуры композита. Они полезны для быстрого прогнозирования деформаций и напряжений в КМПФ при различных температурных и механических воздействиях, что важно при проектировании привода развёртывания. Примером может служить модель, основанная на теории нелинейной вязкоупругости, адаптированная для учёта эффекта памяти формы. Однако феноменологические модели могут быть недостаточно точными для описания сложных явлений, таких как влияние дефектов или неравномерное распределение температуры.

Микромеханические модели, напротив, стремятся учесть взаимодействие между матрицей и наполнителем на микроуровне. Они позволяют более точно прогнозировать поведение КМПФ, учитывая такие факторы, как ориентация волокон, адгезия между матрицей и наполнителем и влияние температуры на свойства каждого компонента. Реализация микромеханических моделей требует значительных вычислительных ресурсов и точного знания свойств компонентов КМПФ. Они особенно полезны для оптимизации состава и структуры КМПФ с целью достижения заданных характеристик привода развёртывания. В качестве примера можно привести модели на основе метода конечных элементов, в которых каждый компонент КМПФ моделируется отдельно.

Выбор конкретной модели зависит от поставленной задачи, требуемой точности и доступных вычислительных ресурсов. Для предварительной оценки общей работоспособности привода развёртывания и выбора оптимальной геометрии можно использовать упрощённую феноменологическую модель. Для детального анализа напряженно-деформированного состояния и оценки влияния различных факторов на надёжность привода необходимо использовать более сложную микромеханическую модель.

Важным аспектом математического моделирования является проверка модели с использованием экспериментальных данных. Это позволяет убедиться в адекватности модели и повысить достоверность результатов.

Экспериментальные исследования необходимы для определения характеристик КМПФ, используемых в приводах развёртывания, и для верификации математических моделей. К таким характеристикам относятся температура фазового перехода (определяющая температуру активации привода), деформация восстановления (определяющая максимальную деформацию, которую может обеспечить привод), прочность, жёсткость, коэффициент теплового расширения и теплопроводность.

Для определения этих характеристик используются различные методы, такие как дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) для определения температуры

фазового перехода [3], динамический механический анализ (ДМА) для определения температуры стеклования и вязкоупругих свойств, испытания на растяжение/сжатие для определения прочности и жёсткости, термомеханический анализ (ТМА) для определения коэффициента теплового расширения и теплопроводности. Важно отметить, что измерения должны проводиться в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации в космосе (вакуум, экстремальные температуры, радиация).

Экспериментальные исследования также необходимы для оценки надёжности и долговечности приводов развёртывания в условиях, имитирующих космическую среду. Это включает в себя испытания на термическое вакуумирование, радиационное облучение и механические вибрации. Результаты этих испытаний позволяют оценить влияние космической среды на свойства КМПФ и работоспособность привода в целом.

Особое внимание следует уделять экспериментальному определению характеристик интерфейса между КМПФ и другими элементами конструкции, такими как солнечные панели или антенные рефлекторы. Надёжное соединение является критически важным для обеспечения работоспособности всей системы.

Перспективы развития. Применение композиционных материалов с памятью формы в приводах развёртывания космических конструкций открывает значительные перспективы, но требует решения ряда серьёзных проблем. Для успешного внедрения этой технологии необходимо усовершенствовать характеристики самих КМПФ, в том числе регулировать температуру фазового перехода для адаптации к конкретным условиям эксплуатации, увеличивать деформацию восстановления при сохранении прочности и жёсткости, а также повышать радиационную и термическую стойкость. Перспективным направлением является разработка КМПФ на основе нанокмпозитов и самовосстанавливающихся материалов, что позволит улучшить их механические и эксплуатационные характеристики, а также повысить надёжность.

Важным аспектом является развитие аддитивных технологий, позволяющих создавать КМПФ сложной формы с высокой точностью и оптимизировать конструкцию приводов развёртывания. Миниатюризация приводов и их интеграция в сложные конструкции, такие как солнечные панели и антенны, также представляют собой важную задачу. Для обеспечения надёжной работы приводов необходимо разрабатывать системы управления развёртыванием в реальном времени, а также проводить тщательные испытания КМПФ и приводов на их основе в условиях, имитирующих космическую среду.

Наконец, стандартизация и сертификация КМПФ для космических применений позволит обеспечить их качество и надёжность. Преодоление этих трудностей потребует скоординированных усилий учёных и инженеров, направленных на проведение фундаментальных и прикладных исследований, разработку новых технологий и создание надёжных и эффективных приводов развёртывания для космических конструкций будущего.

Заключение. В настоящей статье рассматривается вопрос применения композиционных материалов с памятью формы в приводах развёртывания космических конструкций. Проведенный анализ показал, что КМПФ обладают значительным потенциалом для создания компактных, лёгких и надёжных систем развёртывания, превосходящих традиционные механические решения по ряду параметров. Были рассмотрены различные концепции приводов на основе КМПФ, включая приводы на основе изгибающихся балок, трубчатых элементов и пружин, а также комбинированные приводы, сочетающие в себе преимущества различных конструктивных решений.

Несмотря на многообещающие перспективы, для широкого внедрения КМПФ в космическую отрасль необходимо решить ряд задач, связанных с улучшением характеристик материалов, разработкой новых технологий производства и обеспечением надёжности и долговечности при эксплуатации в условиях космического пространства. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку новых композиционных материалов с заданными свойствами, оптимизацию конструкции приводов и проведение комплексных испытаний, имитирующих условия космического пространства.

Литература:

1. Аристов В. Ф., Чернышенко А. О. Композиты с эффектом памяти формы для создания саморазворачивающихся конструкций космического назначения // Решетневские чтения. 2015. №19.
2. Самойлов, Н. С. Применение современных и перспективных механических устройств на основе материалов с эффектом памяти формы в конструкции космических аппаратов / Н. С. Самойлов, И. Г. Уханов, Д. С. Детенышев // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2020. – № 4(50). – С. 69-75.
3. Низина Т. А., Юдин В. А., Кисляков П. А., Киреев А. А. Применение метода дифференциальной сканирующей калориметрии для исследования свойств модифицированных наночастицами эпоксидных композиционных материалов // Вестник ТГАСУ. 2011. №1.

Application of composite materials with shape memory in space structure deployment drives

Rozhkova E.A.^{1,a}, Kustov A.V.^{1,b}

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Russian Federation, 660037, Krasnoyarsk, Krasnoyarsky Rabochy Av., 31

^a e_rozhok@vk.com, ^b alexkust@mail.ru

Key words: composite materials with shape memory, deployment drives, space structures, deployable structures.

The article discusses the use of composite materials with shape memory in space structure deployment drives, due to the need for efficient systems for large-sized spacecraft. An overview of traditional deployment methods is presented and the potential of CMFS as an alternative solution is substantiated. The main characteristics, various concepts of CMFS-based drives (beams, pipes, springs, combined) are described and their advantages and disadvantages are analyzed.

УДК 621.45.018.2

Совершенствование лабораторного стенда для исследования напряженного резьбового соединения при одновременном действии силы затяжки и внешней осевой нагрузки

Стручков А.В.^a

Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, Красноярск, Россия.

^astr-alex-v@mail.ru.

Ключевые слова: исследования, испытания, резьбовое соединение, лабораторный стенд, винтовой пресс, напряженное резьбовое соединение, сила затяжки, внешняя осевая сила.

В статье рассматривается вариант усовершенствования лабораторного стенда, на базе ручного винтового пресса, для проведения лабораторных работ со студентами технических специальностей, изучающих дисциплины детали машин, техническая механика, основы проектирования машин, технические устройства, машины и их элементы по исследованию напряженного резьбового соединения при одновременном действии силы затяжки и внешней осевой нагрузки, стремящейся раскрыть стык. С целью расширения лабораторной базы кафедры на основе существующего оборудования был разработан

лабораторный стенд для исследования напряженных резьбовых соединений, конструкция которого позволяла изготовить необходимые элементы исследуемого резьбового соединения в условиях учебно-производственных мастерских университета. Применительно для разработанной конструкции лабораторного стенда проработана методика проведения исследований напряженного резьбового соединения при одновременном действии силы затяжки и внешней осевой нагрузки, стремящейся раскрыть стык.

Введение. На заседании Совета при президенте по науке и образованию, состоявшемся 23 июня 2014 года, поднимались вопросы модернизации инженерного образования и качества подготовки технических специалистов, где было отмечено о необходимости совершенствования в системе подготовки инженерных кадров, был сделан акцент на практических занятиях [1].

Важную роль в процессе обучения будущих инженерных кадров, в развитии у них необходимых инженерных навыков самостоятельно применять полученные теоретические знания в решении практических задач играют лабораторно-практические занятия.

Выполнение даже небольшого числа лабораторных работ способствует усвоению в наглядной форме основных положений технической дисциплины. Наблюдение за ходом лабораторного эксперимента, обработка и оценка полученных опытным путем результатов, сравнение их с теоретическими данными позволяют студентам изучить методы механических испытаний, которые могут использоваться на производстве. Студенты приобретают также первичные навыки научно-исследовательской работы, умение анализировать результаты эксперимента и делать на их основе выводы, что также помогает формированию студента как специалиста, имеющего опыт работы не только с идеализированными моделями, но и с реальными объектами и явлениями [2].

Для решения выше обозначенных задач, для использования в учебном процессе для студентов технических специальностей, изучающих дисциплины детали машин, техническая механика, основы проектирования машин, технические устройства, машины и их элементы, а так же с целью расширения лабораторной базы кафедры на основе существующего оборудования были разработаны стенд для исследования затянутого болтового соединения [3] и стенд для исследования напряженных резьбовых соединений с целью экспериментального исследования характера работы резьбового соединения при одновременном действии силы затяжки и внешней осевой нагрузки, стремящейся раскрыть стык [4,5].

Задачами при разработке лабораторного стенда ставилось расширение функциональных возможностей существующего в лаборатории винтового пресса и возможность изготовления в условиях мастерских учебного заведения.

Стенд для исследования напряженного резьбового соединения с одновременным действием силы затяжки и внешней осевой силы (рис.1) содержит две цилиндрические стойки 3, жестко закрепленные на основании 1 и две траверсы (верхнюю 2 и нижнюю 5), винт 4 с ходовой резьбой, жестко соединенный с маховиком 6, и гайкой–ползуном 15 с направляющей шпонкой 21 нижней траверсы 5. Устройство содержит силоизмерительное устройство, состоящее из динамометрического кольца 7 с индикатором часового типа 8, жестко соединенное с гайкой-ползуном 15. Стенд для исследования напряженного резьбового соединения содержит резьбовое соединение, жестко соединенное с динамометрическим кольцом 7 через верхний диск 9 и шпильки 16, состоящее из двух жестких дисков – среднего диска 13 и нижнего диска 14, установленной между ними тонкостенной упругой детали 12, выполненной в виде трубы, соединенные с помощью гайки 11 и болта 10, жестко закрепленного на основании 1 стенда соосно винту 4 нижним диском 14, два индикатора 17 и 18 часового типа, установленные с помощью держателей 19 и 20 на стойках 3, измерительный наконечник индикатора 17 установлен на торец болта 10, а индикатора 18 – на плоскость среднего диска 13 [5].

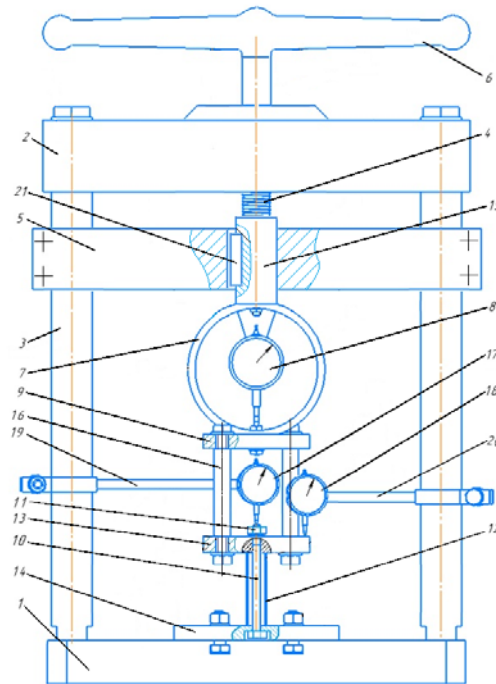


Рис. 1 Стенд для исследования напряженного резьбового соединения

Методика исследования. Стенд для исследования напряженного резьбового соединения работает следующим образом [6].

Определяют основные параметры исследуемых болта 10 и упругой детали 12: диаметр болта d_b ; наружный и внутренний диаметры трубы D_n и $D_{вн}$; длину испытываемой детали l_d и болта l_b . Определяют площади поперечного сечения болта 10 и детали 12:

$$A_b = \frac{\pi \cdot d_b^2}{4}; A_d = \frac{\pi \cdot (D_n^2 - D_{вн}^2)}{4}.$$

После этого исследуемые болт 10 и деталь 12 устанавливают на стенд и жестко фиксируют, устанавливают индикаторы 17 и 18 часового типа, как показано на Рис.1. С помощью гайки 11 выбирают зазоры в соединении и стрелки индикаторов 8, 17 и 18 часового типа устанавливают на ноль. Стенд готов к работе.

Задаваясь значением деформации болта 10 по индикатору 17 затягивается гайка 11, усилие, которое фиксируется при этом силоизмерительным устройством - динамометрическим кольцом 7 с индикатором 8, соответствует силе предварительной затяжки $F_{зат}$. Значение силы предварительной затяжки $F_{зат}$ исследуемого болта 10 определяется по тарировочному графику [6] (рис.2).



Рис. 2 Тарировочный график динамометрического кольца

При этом исследуемый болт 10 получает деформацию растяжения, а деталь 12 (труба) деформацию сжатия. По индикатору 18 часового типа фиксируют деформацию сжатия детали 12 (трубы) λ_d .

По полученным данным строят графики жесткости болта 10 и детали 12 (трубы) (рис.3) [6,7,8].

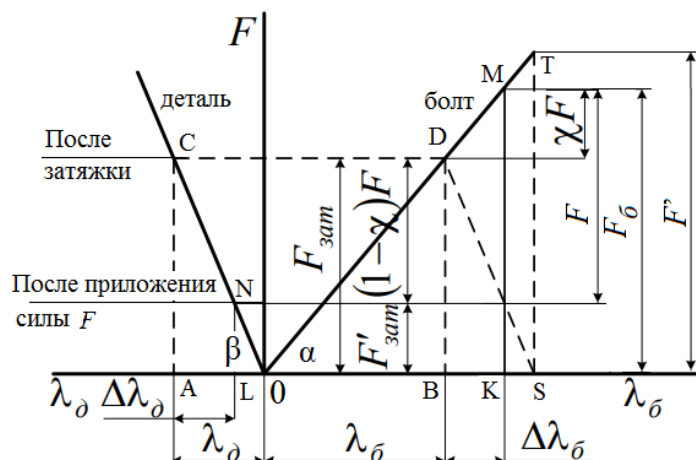


Рис.3 Графики жесткости болта и детали

Для этого в системе координат «деформация λ – сила F » из точки 0 пересечения осей координат проводятся прямые наклонные линии под углами α и β , полученными из выражений:

$$\operatorname{tg} \alpha = C_6 = \frac{F_{\text{зат}}}{\lambda_6}; \quad \operatorname{tg} \beta = C_d = \frac{F_{\text{зат}}}{\lambda_d},$$

где C_6 и C_d – коэффициенты жесткости соответственно болта 10 и детали 12 (трубы):

$$C_6 = \frac{E_6 \cdot A_6}{l_6}; \quad C_d = \frac{E_d \cdot A_d}{l_d}.$$

Из графиков жесткости (Рис.3) болта 10 и детали 12 (трубы) определяют силу предварительной затяжки болта. Для этого в масштабе влево от точки 0 откладывают отрезок $OA = \lambda_d$, а вправо от точки 0 - отрезок $OB = \lambda_6$. Из точек A и B опускают перпендикуляры на графики жесткости болта 10 и детали 12 (трубы) до пересечения в точках C и D. Длина перпендикуляров AC и BD в масштабе соответствует силе предварительной затяжки $F_{\text{зат}}$.

Определяют силовой масштаб графика жесткости болта 10 и детали 12:

$$M_F = \frac{F_{\text{зат}}}{AC} \left(\frac{\text{Н}}{\text{мм}} \right).$$

Определяют коэффициент внешней нагрузки по формуле [6,7,8]:

$$\chi = \frac{\lambda_d}{\lambda_6 + \lambda_d}$$

Для удобства дальнейших исследований прямая ОС переносится параллельно самой себе вправо до пересечения с точкой D. Точка 0 при этом переносится в точку S. Как видно из графика (Фиг.3), отрезок BS характеризует деформацию детали λ_d , полученной от действия силы затяжки $F_{\text{зат}}$, которая в точке S равна нулю. Перпендикуляр ST опущенный из точки S на график жесткости болта в масштабе соответствует предельной силе F' , превышение которой приведет к раскрытию стыка и нарушению герметичности исследуемого соединения.

Далее по тарировочному графику (рис.2) динамометрического кольца 7 по индикатору 8 задается внешняя, растягивающая соединение, нагрузка $F < F'$. Для этого маховик 6 вращается по часовой стрелке, тем самым, винт 4 вкручивается в гайку-ползун 15, придавая

гайке-ползуну 15 и, жестко с ним связанному, динамометрическому кольцу 7, верхнему диску 9 и среднему диску 13, жестко соединенным между собой шпильками 16 поступательное движение вверх вдоль направляющей шпонки 21. В результате болт 10 дополнительно получает деформацию растяжения на величину $\Delta\lambda_{\delta}$, что дает возможность уменьшить деформацию сжатой детали 12 из условия совместимости деформаций на величину $\Delta\lambda_{\delta} = \Delta\lambda_{\delta}$.

На графике жесткости (Рис.3) болта и детали 12 (трубы) вдоль оси деформаций в масштабе откладываются влево от точки В отрезок равный дополнительной деформации растяжения $\Delta\lambda_{\delta}$ болта 10, а от точки А отрезок равный величине снижения деформации сжатия $\Delta\lambda_{\delta}$ детали 12 (трубы). От полученных точек L и К опускаются перпендикуляры до пересечения с графиками жесткости. Отрезок KM дает в масштабе полное расчетное усилие F_{δ} воспринимаемое болтом 10:

$F_{\delta} = F_{\text{зат}} + \chi \cdot F$, где $\chi \cdot F$ - дополнительная к силе затяжки нагрузка на болт от внешней нагрузки.

Тогда на деталь 12 (трубу) будет действовать уже не сила предварительной затяжки $F_{\text{зат}}$, а сила остаточной затяжки $F'_{\text{зат}}$. А полная сила воспринимаемая болтом, как видно из графика, равна: $F_{\delta} = F + F'_{\text{зат}}$.

Условие нераскрытия стыка заключается в том, чтобы остаточная сила затяжки $F'_{\text{зат}} > 0$. Необходимая величина остаточной затяжки из условия нераскрытия стыка [6,7,8]:

$$F'_{\text{зат}} = F_{\text{зат}} + \chi \cdot F - F = F_{\text{зат}} - F \cdot (1 - \chi) > 0.$$

Необходимая величина предварительной затяжки из условия нераскрытия стыка:

$$F_{\text{зат}} > F \cdot (1 - \chi) \text{ или } F_{\text{зат}} = v \cdot F \cdot (1 - \chi),$$

где v – коэффициент затяжки.

Полученные экспериментальные и расчетные данные заносятся в сравнительную таблицу 1.

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные результаты исследования напряженного резьбового соединения с одновременным действием силы затяжки и внешней осевой силы

Материал трубы	Сталь		Алюминий		Медь	
	Теоретич.	Эксперим.	Теоретич.	Эксперим.	Теоретич.	Эксперим.
Площадь поперечного сечения болта A_{δ} , мм ² детали $A_{\text{д}}$, мм ²						
Модуль упругости, болта E_{δ} , МПа детали $E_{\text{д}}$, МПа						
Сила предварительной затяжки $F_{\text{зат}}$, Н						
Коэффициент внешней нагрузки χ						
Сила остаточной затяжки $F'_{\text{зат}}$, Н						
Внешняя нагрузка F , Н						
Полная нагрузка на болт F_{δ} , Н						
Предельная (внешняя) нагрузка F' , Н						

Выводы. Таким образом, с помощью предлагаемого стенда можно экспериментально исследовать характер работы напряженного резьбового соединения, в качестве деталей которого могут быть использованы упругие детали 12 из различных материалов (например, сталь, сплавы алюминия, сплавы меди и др.) при одновременном действии силы затяжки и внешней осевой нагрузки. Разработанный лабораторный стенд для исследования напряженных резьбовых соединений и стенд для исследования затянутого болтового соединения [3] позволили несколько расширить лабораторную базу кафедры. Стенд для исследования затянутого болтового соединения был изготовлен и использован в учебном процессе. Конструкция стенда для исследования напряженных резьбовых соединений при одновременном действии силы затяжки и внешней осевой нагрузки, стремящейся раскрыть стык [5] позволяет в условиях учебно-производственных мастерских университета изготовить его элементы и использовать в учебном процессе.

Литература:

1. Латухина, К. Владимир Путин призвал усовершенствовать подготовку инженерных кадров / Латухина, К. // Российская газета. – 2014 – 23 июня - Федеральный выпуск: №138(6410).
2. Суходоева А.А. Роль лабораторных работ при изучении технических дисциплин в вузе: сборник трудов конференции. // Педагогические и социальные вопросы образования: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Чебоксары, 7 авг. 2020 г. – Чебоксары, 2020. – С. 148-152. – ISBN 978-5-907313-65-1.
3. Патент РФ на полезную модель № 206443 (РФ) Стенд для исследования затянутого болтового соединения / Стручков А.В. (РФ) 2021.
4. Стручков А.В. Разработка стенда для исследования напряженного резьбового соединения на базе винтового пресса / А.В. Стручков, А.И. Келлер // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Материалы XIV Международной научно-практической конференции (12 - 16 апреля 2021 года, г. Красноярск), СибГУ им. М.Ф.Решетнева, Красноярск, 2021. Т. 1. № 12. С. 527-529.
5. Патент РФ на полезную модель № 232052 (РФ) Стенд для исследования напряженного болтового соединения / Стручков А.В. (РФ) 2025.
6. Детали машин: лабораторный практикум / Ю.И. Верхов, В.А. Меновщиков, В.И. Чепелев. Г.В. Батаева. Красноярск: КрасГАУ, 1999. – 62 с.
7. Решетов Д.Н. Детали машин: учебник для студентов машиностроительных и механических специальностей вузов. – 4-е изд. Перераб. И лоп. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.
8. Иосилевич Г.Б. Детали машин: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.

Improvement of a laboratory test bench for studying stressed threaded connections under simultaneous tightening force and external axial load

Strutchkov A.V.^a

Siberian Federal University, 79 Svobodny Avenue, Krasnoyarsk, Russia.

^astr-alex-v@mail.ru.

Keywords: research, testing, threaded connection, laboratory test bench, screw press, stressed threaded connection, tightening force, external axial force.

The article discusses an improved version of a laboratory test bench based on a manual screw press, designed for conducting laboratory sessions with engineering students specializing in disciplines such as Machine Parts, Technical Mechanics, Fundamentals of Machine Design, Technical Devices, and Machine Elements. The focus is on studying stressed threaded connections under the simultaneous action of a tightening force and an external axial load that tends to separate the joint. To expand the laboratory capabilities of the department, a test bench for analyzing stressed threaded connections was developed using existing equipment. The design of the bench enables the fabrication of essential components of the threaded connection within the educational and production workshops of the university. For the developed test bench, a

methodology for conducting experiments on stressed threaded connections under the combined influence of a tightening force and an external axial load (aimed at joint separation) has been thoroughly elaborated.

УДК 355.695.2

Эксплуатационные свойства пластичных смазочных материалов и моторных масел

Ващишин С. П.^{1,a}, Ващишина А. П.^{1,b}

¹ФГБОУ ВО Брянский государственный технический университет, Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7, Россия

^avashhi.anya@yandex.ru

Ключевые слова: моторное масло, динамическая вязкость, трение, частицы износа, двигатель, эксплуатация машин.

Целью исследований данной работы была оценка вязкостных свойств моторного масла в зависимости от температуры до и после замены на современных отечественных автомобилях бензинового и дизельного типа, определение спектральных характеристик и рентгено-флуоресцентный анализ частиц износа после пробега. Оценена степень вязкости полусинтетических масел двух типов. Для оценки влияния моторного масла на работу двигателя был проведен ИК-спектрометрический анализ и определена толщина смазывающей пленки. Результаты испытаний показали качественное и количественное изменение характеристических частот нового моторного масла и после процесса эксплуатации 10 000 км. Рентгено-флуоресцентный анализ дает возможность анализировать продукты износа и определять какой механизм в двигателе наиболее сильно подвержен износу. Спектры моторных масел показывают, что спектральные линии имеют характерные частоты поглощения и свидетельствуют об изменении физических и химических свойств моторного масла в двигателе. Большое количество кислородсодержащих соединений помогает снизить выбросы при сгорании. Использование термопластичных добавок с дизельным топливом до 50% в смеси может использоваться в дизельных двигателях при более высоких нагрузках. Полученные результаты свидетельствуют о том, что данные методы можно использовать для анализа и контроля режима работы моторных масел в двигателе, что также позволяет определять механизмы износа и в дальнейшем применять соответствующие добавки в масло, чтобы повысить эксплуатационные свойства.

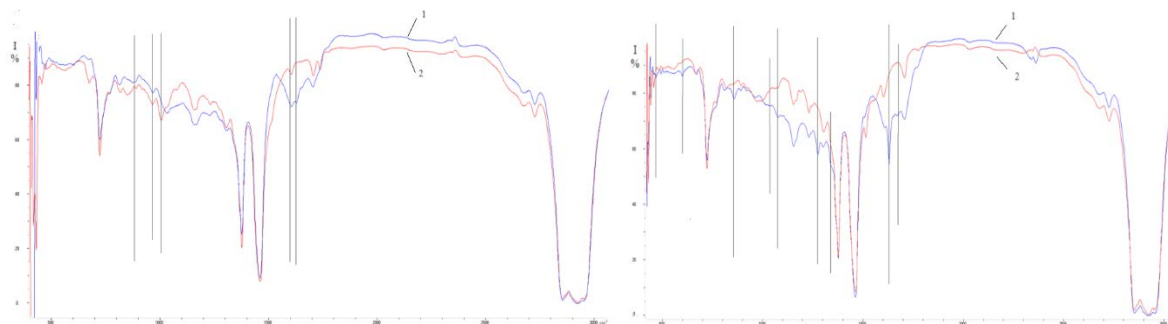
Введение. Смазочные масла являются необходимым компонентом для широкого спектра машин, используются для снижения трения и износа путем разделения поверхностей, как металлических, так и пластиковых, которые движутся относительно друг друга. Они также являются носителями для различных других специальных химикатов, которые ингибируют коррозию, борются с окислением и изменяют вязкость среди других свойств. Важно понимать конечное использование смазочной жидкости, поскольку требования будут различаться в зависимости от области применения. Необходимо отметить, что отдельные химикаты и смазочные жидкости проходят строгие испытания на протяжении всего процесса проектирования, чтобы гарантировать совместимость и снизить риски отказов при вводе масла и оборудования в эксплуатацию. Смазочные материалы должны соответствовать отраслевым и эксплуатационным требованиям в различных лабораторных испытаниях.

Методы и материалы. Одним из методов оценки качества является инфракрасная спектроскопия на Фурье спектрометре ФСМ-1201. Данный метод используется для

определения изменений в отработанном масле. Толщина пленки масла составляла 0,007 мкм. Спектральные характеристики показывают наличие молекулярных изменений, что связано с истощением присадок, процессами окисления, нитрования, образования сажи и разбавление топлива. Спектры использованных и неиспользованных образцов масла были измерены и сравнены для определения изменений поглощения между различными образцами, возникающих в результате разложения масла и любых химических реакций, которые происходят во время высокотемпературной смазки двигателя. Для определения частиц износа в отработанных образцах использовался рентгено-флуоресцентный метод (РФА) анализа СУР 01-РЕНОМ. РФА позволяет определять количество элементов в анализируемой пробе, при этом для анализа используется минимальный объем пробы— примерно 1-2 мл масла помещается в измерительную кювету, время анализа составляет 2-6 минут. В процессе износа двигателя в масло попадают отдельные элементы, алюминий, хром, железо и др.

В качестве образцов для исследований использовали моторное масло для бензинового двигателя LUKOIL LUXE 5W-40 и дизельного LUKOIL LUXE TURBO DIESEL 10W-40. Оба образца использовали в двигателях транспорта отечественного производителя после 10 000 км пробега.

Результаты и обсуждение. Смазочные масла подвергаются воздействию высоких температур в присутствии кислорода, что приводит к его окислению и деградации с образованием новых продуктов— кетоны и альдегиды [1, 2]. Образовавшиеся соединения растворяются в масле или остаются во взвешенном состоянии. Карбоновые кислоты повышают кислотность масла. Процесс окисления приводит к значительным изменениям характеристик и эффективности масла, повышая кислотность и вязкость масла, что приводит также к коррозии материала [3,4]. Данные процессы приводят к тому, что смазочные масла становятся более агрессивными к металлическим поверхностям, уменьшается вероятность образования тонкой защитной пленки, что приводит к более высокому износу двигателя. На рис.1 (а, б) представлены ИК-спектры моторного масла для бензиновых и дизельных двигателей.



а) 1—отработанное масло; 2—новое масло. б) 1—отработанное масло; 2—новое масло.

Рис.1 ИК-спектры моторного масла до и после использования
а) LUKOIL LUXE 5W-40; б) LUKOIL LUXE TURBO DIESEL 10W-40

Как видно из рис. 1 (а, б), интенсивности характеристических частот значительно отличаются. Степень окисления масла определяется карбонильной группой в области $1670\text{--}1800\text{ см}^{-1}$, что соответствует энергии поглощения углеродных связей и кислорода в окисленном масле. Помимо процессов окисления, в данной области наблюдается наличие продуктов нитрования - $1650\text{ до }1600\text{ см}^{-1}$. Сульфатные продукты разложения накапливаются в двигателе с течением времени, увеличивают образование нагара и ухудшают качество масла, в реакциях с водой могут давать побочные неорганические продукты, такие как серная кислота. Эти кислоты истощают запас пакета присадок. Характеристические частоты сульфатов находятся в области $1180\text{--}1120\text{ см}^{-1}$. Важной является область 1032 см^{-1} , 967 см^{-1} и 1157 см^{-1} , которая относится к колебаниям связи $\text{C}=\text{C}$ олефиновых углеводородов. Содержание ненасыщенных олефинов связано с вязкостью базового масла: чем выше содержание олефинов, тем более вязким является базовое масло [5]. Область колебаний 2920 см^{-1} соответствует колебаниям групп C-H в алкильной цепи и определяет старение масла и

его химические модификации. Из литературы известны противоизносные 970 см^{-1} , антиокислительные 1080 см^{-1} и присадки, улучшающие вязкость 1162 см^{-1} , диспергаторы 1232 см^{-1} [6].

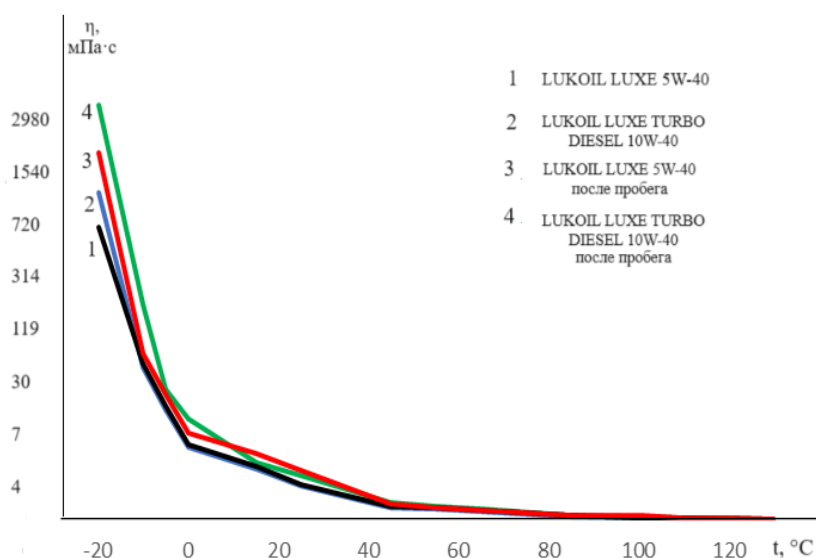


Рис. 2. Значение динамической вязкости моторных масел

На рис. 2 показана динамическая вязкость масел, содержащих различные примеси, при -20°C и 120°C . При увеличении температуры вязкость масла уменьшается. Значения динамической вязкости при $70\text{--}120^{\circ}\text{C}$ имеют постоянные близкие значения и не показывают существенных отличий, это может быть связано с защитными присадками. Необходимо отметить, что анализ вязкости масла до и после пробега показал, что использованное масло из-за процессов окисления имеет значительное повышение значения вязкости. Данный эффект связан с воздействием кислорода воздуха и повышенной температуры эксплуатации двигателя. Процесс окисления приводит к образованию соединений спиртов, альдегидов, органических кислот и к реакциям полимеризации, приводящими к образованию густых смол, нарушающих работу двигателя.

Также в процессе эксплуатации моторных масел образуется сажа, отдельные частицы которой могут образовывать цепочечные структуры размером до 1 микрона. Частицы сажи могут выступать абразивными частицами и нарушать работу компонентов двигателя. Сажа действует как загуститель масла, что приводит к увеличению вязкости масла (рис.2 образцы №3, 4). Как видно из рис.3, при нагревании смазочного материала вязкость значительно меняется с добавлением присадок [4]. Можно отметить, что использование сульфоприсадки явно показывает завышенные значения динамической вязкости, что говорит о высоком коэффициенте внутреннего трения и материал становится более плотным. Значения остальных материалов имеют незначительные изменения (рис.3) [7].

Процесс окисления моторных масел сопровождается накоплением прилипших продуктов коррозии, которые быстро удаляются в процессе износа, тем самым образуется свежая металлическая поверхность, подвергающаяся дальнейшей коррозии. Данный процесс имеет большую скорость изнашивания на стенках цилиндра двигателя. В точке узла трения между кольцом и цилиндром вся смазочная пленка разрушается, и режим смазки является граничным, вследствие чего данный контакт очень чувствителен к загрязнениям [7]. Загрязнения, образующие масляную пленку между кольцом и цилиндром, приводят к абразивному износу. Истирание твердыми частицами также приводит к высокому трению и скорости износа при адгезионном режиме износа. Смазочное масло содержит в себе чрезвычайно мелкие частицы, которые могут закупоривать мелкие пространства между поверхностями и вызывать абразивный износ, а высоки температурный режим приводит к образованию нагара, вызывающего залипанию. Данные процессы приводят к неполному сгоранию продуктов [8].

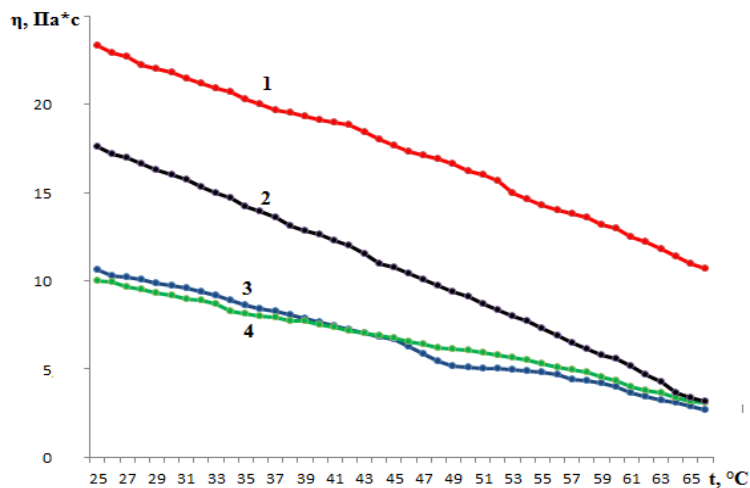


Рис. 3 Изменение динамической вязкости

1– сульфоприсадка; 2– фосфорорганическая присадка; 3– без присадки; 4– гидрохинон

Выводы. Измеренные спектры отработанных и неиспользованных моторных масел показывают, что спектральные линии имеют характерные частоты поглощения и свидетельствуют об изменении физических и химических свойств моторного масла в двигателе. Что касается бензиновых и дизельных двигателей, то они имеют аналогичные характеристики у взятых новых образцов. Увеличение загрязнений и повышение вязкости отработанных масел связано с наличием образовавшихся примесей в процессе окисления и полимеризации базового масла, и условиями эксплуатации. Отработанные дизельные моторные масла показали значительно меньшую нитрацию по сравнению с бензиновыми аналогами. выбросы оксидов азота у дизельных двигателей значительно выше. Поскольку как нитрование масла, так и выбросы оксидов азота напрямую связаны с процессом сгорания, эти различия также могут быть связаны друг с другом. Выбросы оксидов азота обычно объясняются более высокой степенью сжатия и температурой сгорания дизельных двигателей, что также может служить возможным объяснением различий в процессе нитрования. РФА отработанного масла показал значительные изменения в концентрациях элементов, относящихся к различным структурам в двигателе. Однако, изученный ряд образцов достаточно мал, поэтому необходимо увеличить количество образцов и пробоотбор в различные периоды эксплуатации, чтобы можно было убедиться в том, что аналогичный эффект наблюдается на протяжении всего режима работы двигателя. Полученные результаты свидетельствуют о том, что данные методы можно использовать для анализа и контроля режима работы моторных масел в двигателе, что также позволяет определять механизмы износа и в дальнейшем применять соответствующие добавки в масло, чтобы повысить эксплуатационные свойства.

Литература:

1. Adamczewska J. Z. and Love C. Oxidative Stability of Lubricant Measured by PDSC CEC L-85-T-99 Test Procedure // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2005. – №80. – Pp.753–759.
2. Semin A. R. and Rosli A. B. Combustion Temperature Effect of Diesel Engine Convert to Compressed Natural Gas Engine. // *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2009. – № 2. – pp. 212–216.
3. Owrranga F., Mattsson H., Olsson J., and Pedersen J. Investigation of Oxidation of a Mineral and a Synthetic Engine Oil. // *Thermochimica Acta*. – 2004. – №413. – pp 241–248.
4. Шалыгин М. Г., Буяновский И. А., Самусенко В. Д., Ващишина А. П. Трибологические свойства полужидкого смазочного материала с присадками поверхностно-активных веществ // *Трение и износ*. – 2023. – Т. 44, № 5. – С. 418-426. – DOI 10.32864/0202-4977-2023-44-5-418-426.

5. Totten G.E., Westbrook S.R., Shah R.J. Fuels and Lubricants Handbook: Technology, Properties, Performance, and Testing. ASTM International, Copyright by ASTM. – 2014, ISBN of 978-0-8031-4551-1. –1087 p.
6. M. Diaby, M. Sablier, A. Le Negrate, M. El Fassi, and J. Bocquet. Understanding carbonaceous deposit formation resulting from engine oil degradation // Carbon. – 2009. –№47(2). –p. 355-366.
7. Шалыгин М. Г. Математическое моделирование скорости изнашивания пары трения колесо локомотива-рельс / М. Г. Шалыгин, А. П. Ващишина // Трение и износ. – 2023. – Т. 44, № 1. – С. 34-40. – DOI 10.32864/0202-4977-2023-44-1-34-40.
8. Тихомиров В.П., Измеров М.А., Кузнецов С.В., Горностаева А.Г. Трение металл-металлических поверхностей // Научные технологии в машиностроении. – 2022. – № 3 (129). – С. 40-48.

PERFORMANCE PROPERTIES OF PLASTIC LUBRICANTS AND MOTOR OILS

Vashishin S. P.^{1,a}, Vashishina A. P.^{1,b}

¹Bryansk State Technical University, Bryansk, 50th Anniversary of October Boulevard, 7, Russia

^avashhi.anya@yandex.ru

Keywords: motor oil, dynamic viscosity, friction, wear particles, engine, machine operation.

The purpose of this work was to evaluate the viscosity properties of motor oil depending on the temperature before and after replacement on modern domestic cars of gasoline and diesel type, to determine the spectral characteristics and X-ray fluorescence analysis of wear particles after the run. The degree of viscosity of semi-synthetic oils of two types was estimated. To assess the effect of motor oil on engine operation, IR spectrometric analysis was carried out and the thickness of the lubricating film was determined. The test results showed a qualitative and quantitative change in the characteristic frequencies of new motor oil and after the operation process of 10,000 km. X-ray fluorescence analysis makes it possible to analyze wear products and determine which mechanism in the engine is most susceptible to wear. The spectra of motor oils show that the spectral lines have characteristic absorption frequencies and indicate a change in the physical and chemical properties of the motor oil in the engine. A large number of oxygen-containing compounds helps to reduce emissions during combustion. The use of thermoplastic additives with diesel fuel up to 50% in the mixture can be used in diesel engines at higher loads. The results obtained indicate that these methods can be used to analyze and control the operating mode of motor oils in the engine, which also allows determining wear mechanisms and then using appropriate additives in the oil to improve performance properties.

Технология нанесения графенового покрытия на металлическую поверхность методом термодиффузии

Шалыгин М.Г.^{1,a}, Евтух Г.Е.^{1,b}

¹Брянский государственный технический университет, бул. 50 лет Октября 7, Брянск, Россия

^a migshalugin @yandex.ru, ^b grishan32@mail.ru

Ключевые слова: графен, углеродные атомы, металлические поверхности, методы нанесения, термодиффузия.

Известно, что надежная работа машин и механизмов определяется износостойкостью поверхностного слоя металлических узлов трения. В процессе эксплуатации изменяются структура, свойства и состояние материала сопряженных деталей. При этом проблема для металлических трибосопряжений состоит в разработке технологий нанесения функциональных наноматериалов, обеспечивающих образование на поверхности трибоконтакта структур, позволяющих направленно изменять трибологические параметры узла трения. Основная же задача в сфере инженерии металлических поверхностей узлов трения – синтез технологии и материалов нанесения покрытий. Из всего многообразия упрочнения поверхности и улучшения трибологических характеристик большие возможности предоставляют методы термодиффузионной обработки. В результате разработанной в рамках представленной работы технологии планируется проведение исследований современных методов модификации металлической поверхности и получения на их поверхности многослойных покрытий, обеспечивающих высокую износостойкость.

Проблема повышения износостойкости пар трения приобретает все большую актуальность в связи с необходимостью повышения качества, надежности и долговечности современных машин. Большинство машин и механизмов выходит из строя вследствие изнашивания деталей пар трения - подшипников. Одним из наиболее эффективных и экономичных путей повышения долговечности деталей, работающих в условиях контактной усталости и истирания, является создание на трущихся поверхностях прочных износостойких слоев, позволяющих резко увеличивать усталостную прочность, коррозионную стойкость и износостойкость материалов. Толщина наносимого покрытия зависит от режимов работы узла трения, его назначения, преобладающего вида изнашивания и величины допустимого износа. Толщина покрытия может изменяться в широких пределах: от долей микрон – для износостойких покрытий газодинамических подшипников скольжения до нескольких миллиметров – в случае металлизации деталей при восстановительном ремонте техники.

Газодинамические подшипники – это относительно новый вид опор энергетических аппаратов, которые обеспечивают эффективное разделение поверхностей на высоких скоростях вращения вала. Однако в моменты пуска-останова, когда прочный газовый клин не сформирован, лепестки трутся о вал. Для предотвращения изнашивания деталей на несущие поверхности лепестков наносятся антифрикционные покрытия с низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью [1].

В последние годы с развитием нанотехнологий исследования по применению наноуглеродных материалов в качестве модификаторов смазочных материалов получили широкое распространение. На поверхностях трения наночастицы заполняют собой микронеровности, в результате чего уменьшается шероховатость поверхности, что приводит к уменьшению коэффициента трения. Поверхности, защищенные покрытиями с

наночастицами, обладают повышенной прочностью и сопротивлением к истираемости, низким коэффициентом трения.

Графен стал одним из самых изучаемых материалов благодаря своим исключительным свойствам, таким как высокая прочность, гибкость и проводимость. Эти характеристики делают его привлекательным для создания различных композитных материалов и для использования в области триботехники.

Графен был получен с помощью микромеханического расщепления графита. В этом методе поверхность графита плотно прижимается и трется о полированную поверхность кремния, покрытую слоем оксида SiO_2 толщиной 300 нм. Слой SiO_2 такой толщины позволяет увидеть графеновые листы в обычном оптическом микроскопе (рис.1).

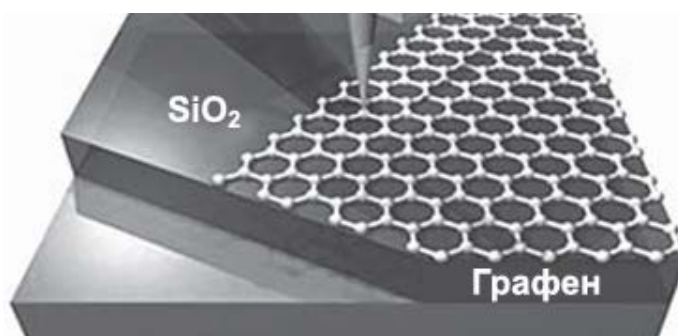


Рис.1. Слой SiO_2 , позволяющий увидеть графеновые листы в микроскопе

Для эффективного использования графена в триботехнических приложениях необходимо его нанесение на различные подложки, в том числе на металлические поверхности. Металлы часто используются в качестве подложек благодаря своей хорошей проводимости и механической прочности, что делает их идеальными кандидатами для поддержания функциональности графеновых структур. Однако к настоящему времени наиболее часто в качестве подложки для графена используется подложка из кремния на поверхности, которой имеется слой оксида (SiO_2). Подложка из SiO_2 служит изолирующим слоем, а легированный кремний играет роль затвора и позволяет управлять концентрацией носителей заряда в графене [2].

Очевидно, что упрочнение тонкого поверхностного слоя детали является прогрессивным направлением в технологии машиностроения, так как позволяет экономить дорогостоящие легированные стали, цветные металлы и другие дефицитные материалы, повышать ресурс и надежность механизмов, снижать энергоемкость производства, успешно решать проблему восстановительного ремонта в целях повторного использования изношенных деталей и т. д.

В качестве материала лепестков используется сплав 36НХТЮ или 40ХНЮ. Легированные стали, обладающие высокой износостойкостью и контактной прочностью, а также жаропрочные стали, применяемые в узлах трения, работающих при повышенных температурах, дороги из-за высокого содержания легирующих элементов. В связи с этим возникает необходимость повышения прочностных и антифрикционных свойств ЛГДП.

Несмотря на большое количество научных исследований, к настоящему времени нет достаточно надежных и недорогих технологий, позволяющих эффективно формировать и восстанавливать рабочие слои высоконагруженных лепестков газодинамических подшипников. Поэтому, увеличение надежности и долговечности антифрикционных слоев подшипников представляет собой важную научную проблему.

Поверхностную обработку металлов с целью повышения износостойкости можно производить несколькими путями: 1) нанесением защитного слоя или покрытия каким-либо из методов осаждения покрытий; 2) преобразованием поверхностного слоя металла химическим путем либо диффузионным насыщением поверхности, т. е. методами химико-термической обработки (ХТО), 3) новыми методами электронно-лучевой и лазерной закали

и другими, менее распространенными методами, например методом магнитно-электрического упрочнения.

Перспективным в этом отношении представляется использование термодиффузионной химико-термической обработки, позволяющей радикальным образом изменить физико-химические свойства поверхностных слоев. Однако до настоящего времени ХТО при нанесении графеновых нанопокровов использовалось довольно редко. При получении графеновых покровов необходимо на поверхность детали нанести диоксид кремния путем диффузионного силицирования. Применительно же к материалам ЛГДП силицирование не изучалось. Несмотря на большое количество исследований процессов диффузионного силицирования (ДС) легированных сталей [3], оно имеет весьма ограниченное промышленное применение. Это связано, главным образом, с трудностями создания качественных (беспористых) силицированных слоев, обеспечивающих наилучшую адгезию.

Химико-термической обработкой называется процесс поверхностного насыщения стали различными элементами с целью придания ей соответствующих свойств. Химико-термическая обработка получила наибольшее распространение как метод упрочнения поверхностей из-за простоты, доступности и высокой эффективности. Она отличается от других видов термической обработки тем, что при этой обработке кроме структурных изменений происходят изменения состава и строения поверхности за счет диффузии в нее элементов в атомарном состоянии из внешней среды при высоких температурах. Основная цель – упрочнение поверхности деталей, повышение твердости, износостойкости, усталостной прочности и повышение стойкости против воздействия агрессивных сред.

Износостойкое покрытие на металлические изделия наносят в герметичном контейнере, размещенном в муфельной печи. Обрабатываемые детали размещают в контейнере регулярным образом в оснастке с опорными поверхностями, фиксирующей. Насыщающая смесь содержит кристаллы вещества чистотой 0,97-0,99% с коэффициентом эффективной площади поверхности 10. Насыщающая смесь имеет гранулометрический состав в интервале 3-7 мкм, а ее масса составляет 1-4% от массы обрабатываемых деталей или 130-140% от массы требуемого покрытия на поверхности обрабатываемых деталей. Указанная задача и технический результат обеспечиваются нагревом в муфельной печи до температуры 350-4500 С в течение времени, достаточного для диффузии паров насыщающего вещества на поверхность обрабатываемых изделий и образования защитного слоя заданной величины.

Описываемый процесс относится к области технологий нанесения защитных износостойких покровов, и может быть использован для нанесения диффузионных кремнеевых покровов на детали разнообразной конфигурации, а также может найти применение в практике нанесения наноразмерных графеновых покровов для узлов трения деталей энергетического и транспортного машиностроения.

Предлагаемый в данной работе способ нанесения и графенового покровов, и подложки из оксида кремния методом термодиффузии включает в себя следующие операции:

1. Первым делом поверхность тщательно очищают. Если на изделии имеются следы смазывающих материалов, то их легко удалить при помощи специальных составов – дигрейзеров. Для того чтобы удалить с поверхности следы коррозии и окалину, применяют пескоструйную установку. Кроме того, применяется и ультразвуковая чистка.

2. Перед проведением процедуры деталь обязательно взвешивают – это нужно, чтобы точно определить количество состава, с помощью которого и будет проведено нанесение кремневого, а за тем и графенового, покровов. Технология позволяет изменять количество смеси, которая наносится на обрабатываемую поверхность, в зависимости от объема готового раствора, а также от массы, геометрических характеристик детали, ее конструкции.

3. После того как деталь очищена и известен ее вес, она аккуратно помещается в специальную муфельную печь, где непосредственно и осуществляется термодиффузионное силицирование.

4. Температурный режим подбирают исходя от типа обрабатываемой детали, марки сплава и принятых стандартов.

5. Среднее время процесса зависит от мощности оборудования, а также от состава рабочей смеси. Деталь подвергается нагреву в течении времени диффузии кремния (графена) на обрабатываемую поверхность до образования заданной величины.

6. Когда обработка будет окончена, изделия достают и очищают от остатков насыщающих смесей.

При этом на поверхности обрабатываемой детали образуется переходный слой, состоящий из основы в виде кристаллов, стали и внедренных в междокристаллитную решетку соединений кремния. Это обеспечивает высокую прочность сцепления поверхностного слоя с подложкой и как следствие позволяет обеспечить прочность и непрерывность покрытия во всех направлениях.

7. Далее процесс повторяется в той же последовательности. Насыщающим веществом, образующим покрытие на поверхности детали, теперь будет порошкообразный графен.

Технология достаточно проста, но потребуются наличие специального оборудования

Заявленное покрытие решает задачу, направленную на создание на поверхности металлической детали покрытия с равномерной толщиной, и однородной структурой и высокой адгезией к поверхности обрабатываемой детали. Эти показатели не должны зависеть от абсолютных размеров детали и ее конфигурации.

Указанная технология обеспечивает создание на изделии защитной пленки, характеризующейся высокой адгезией.

Технический результат, получаемый при использовании данной технологии, заключается в увеличении срока службы изделия за счет уменьшения его износа.

Литература:

1. Шалыгин М.Г. Трибодиагностика подшипника компрессора газотурбинного агрегата / М.Г. Шалыгин, Е.С. Евтух, Г.Е. Евтух // Транспортное машиностроение. - 2024. - № 10 (34). - С. 12-17.
2. Wu Z.S., Ren W., Gao L., Zhao J., Chen Z., Liu B., Tang D., Yu B., Jiang C., Cheng H.–M. Synthesis of graphene sheets with high electrical conductivity and good thermal stability by hydrogen arc discharge exfoliation // ACS nano. – 2009. – V. 3. – N. 2. – P. 411–417.
3. Ляхович Л. С. Силицирование сталей и сплавов / Л. С. Ляхович, Л. Г. Ворошнин, Э.Д. Щербаков, Г.Г. Панич. - Минск: Наука и техника, 1972. - 280 с.

Technology of applying graphene coating to metal surface by thermal diffusion method

Shalygin, M.G.^{1,a} Evtukh G.E.^{1,b}

¹Bryansk State Technical University, 7, 50 Let Oktyabrya Blvd, Bryansk, Russia

^amigshalygin @yandex.ru, ^bgrishan32@mail.ru

Keywords: graphene, carbon atoms, metal surfaces, deposition methods, thermal diffusion.

It is known that reliable operation of machines and mechanisms is determined by the wear resistance of the surface layer of metal friction units. During operation, the structure, properties and state of the material of the mating parts change. At the same time, the problem for metal tribounits is to develop technologies for applying functional nanomaterials that ensure the formation of structures on the tribocontact surface that allow for a targeted change in the tribological parameters of the friction unit. The main task in the field of engineering metal surfaces of friction units is the synthesis of coating application technology and materials. Of all the variety of surface hardening and improvement of tribological characteristics, thermal diffusion treatment methods provide great opportunities. As a result of the technology developed within the framework

of the presented work, it is planned to conduct research on modern methods of modifying a metal surface and obtaining multilayer coatings on their surface that provide high wear resistance.

УДК 621.793.7:621.762

Повышение износостойкости металлических поверхностей нанесением покрытия на основе графена

Евтух Е.С.^{1,a}, Евтух Г.Е.^{1,b}

¹Брянский государственный технический университет, бул. 50 лет Октября 7, Брянск, Россия

^a karmanova.helena@yandex.ru, ^b grishan32@mail.ru

Ключевые слова: графен, углеродные атомы, металлические поверхности, методы нанесения, износ.

Трение и износ остаются основной причиной рассеивания механической энергии и выхода систем из строя. Недавние исследования показали, что графен может стать мощным материалом для борьбы с этой проблемой. Графен, представляющий собой однослойную решетку углеродных атомов, стал объектом интенсивных исследований благодаря своим уникальным электрическим, механическим и тепловым свойствам. В последние годы его интеграция с различными материалами, включая металлические поверхности, привлекает большое внимание в контексте разработки новых функциональных материалов и нанoeлектронных устройств. Покрытия на основе графена стали перспективным решением для повышения коррозионной и износостойкости различных материалов. В данной статье рассмотрены основные методы нанесения графена на металлические поверхности, их преимущества и недостатки, а также перспективы применения.

Коррозия и износ являются двумя основными проблемами, с которыми сталкиваются промышленные агрегаты и конструкции, что приводит к значительным экономическим потерям и проблемам безопасности. Коррозия – это постепенная деградация материалов из-за химических реакций с окружающей средой, а износ – это прогрессирующая потеря материала из-за механического контакта между поверхностями. Традиционные материалы, такие как металлы, имеют ограничения с точки зрения долговечности, адгезии и экономической эффективности. Покрытия на основе графена продемонстрировали большой потенциал для преодоления этих ограничений и обеспечения превосходной коррозионной стойкости и износостойкости. Графен стал одним из самых изучаемых материалов благодаря своим исключительным свойствам, таким как высокая проводимость, прочность и гибкость. Для эффективного использования графена в таких приложениях необходимо его нанесение на различные подложки, в том числе на металлические поверхности. Металлы часто используются в качестве подложек благодаря своей хорошей проводимости и механической прочности, что делает их идеальными кандидатами для поддержания функциональности графеновых структур.

Покрытия на основе графена могут быть синтезированы различными методами, включая химическое осаждение из паровой фазы, методы на основе растворов и напыление. Чешуйки или листы графена могут быть диспергированы в подходящем растворителе и распылены на поверхность материала для формирования тонкого слоя покрытия на основе графена. Толщину и свойства покрытия можно контролировать, регулируя концентрацию графеновой дисперсии, параметры распыления и условия отжига.

Одним из основных преимуществ покрытий на основе графена является их высокая химическая стойкость и водонепроницаемость. Графен обладает высокой устойчивостью к

коррозии благодаря своей непроницаемой структуре, препятствующей проникновению коррозионно-активных веществ. Было показано, что графеновые покрытия значительно снижают скорость коррозии различных металлов, таких как сталь, алюминий и медь. Покрытия на основе графена также были испытаны в суровых условиях, таких как морская вода и растворы кислот, и продемонстрировали превосходную коррозионную стойкость.

В дополнение к коррозионной стойкости покрытия на основе графена также обеспечивают превосходную износостойкость. Графен обладает исключительными механическими свойствами, в том числе высокой прочностью, жесткостью и ударной вязкостью, что делает его идеальным материалом для повышения износостойкости поверхностей. Графеновые покрытия позволяют значительно снизить скорость изнашивания различных материалов, в том числе металлов, полимеров и керамики. Было показано, что покрытия на основе графена обеспечивают повышение износостойкости до 100 раз по сравнению с традиционными покрытиями. Предел прочности графена составляет около 130 гигапаскалей (ГПа) [1].

Выдающиеся свойства покрытий на основе графена привели к их применению в различных отраслях, включая аэрокосмическую, автомобильную, морскую и энергетическую. Покрытия на основе графена могут наноситься на компоненты самолетов для повышения их устойчивости к коррозии и износу. Графеновые покрытия также можно наносить на детали, чтобы повысить их долговечность и уменьшить трение. В морской промышленности графеновые покрытия могут защитить корабли от коррозии и биологического обрастания. Графеновые покрытия также можно использовать в возобновляемых источниках энергии, таких как солнечные элементы и батареи, для повышения их производительности и долговечности.

Графен (англ. graphene) – это двумерная аллотропная форма углерода, в которой объединённые в гексагональную кристаллическую решётку атомы образуют слой толщиной в один атом. Атомы углерода в графене соединяются между собой sp^2 -связями

Каждый атом углерода в графеновом листе связан с тремя ближайшими соседями σ -связью и вносит один электрон в зону проводимости, которая простирается по всему листу. Эти зоны проводимости делают графен полуметаллом с необычными электронными свойствами (рис.1). Листы графена укладываются в стопку, образуя графит с межплоскостным расстоянием 0,335 нм (3,35 Å).

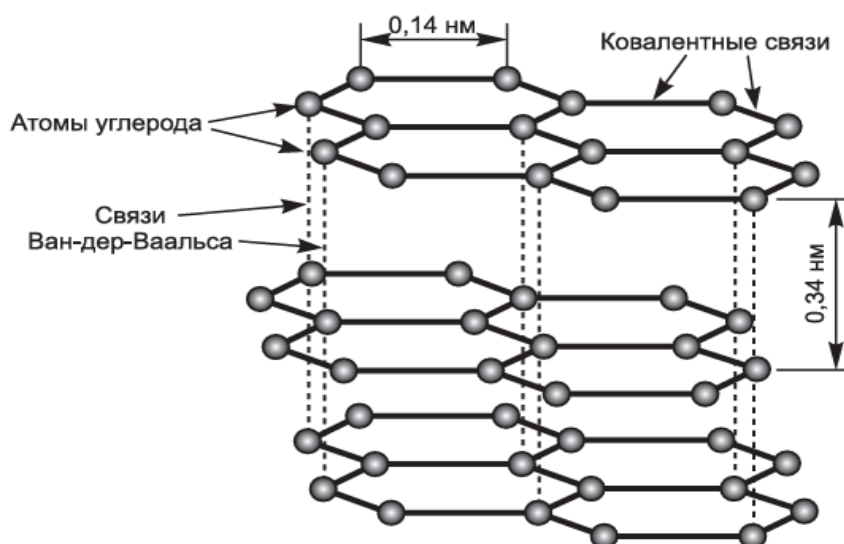


Рис.1 Графеновые слои в графите, гексагональная форма углерода

Идеальный графен состоит исключительно из шестиугольных ячеек. Присутствие пяти- и семиугольных ячеек будет приводить к различного рода дефектам.

Графен также имеет разновидности. Например, двухслойный графен. Это разновидность графена, образованная двумя близко расположенными слоями графена. Слои

графена расположены на расстоянии меньше 1 нм друг от друга. Электроны из одного слоя графена могут туннелировать в другой слой.

Графен был получен двумя британскими учеными российского происхождения Константином Новоселовым и Андреем Геймом, работающими в Университете Манчестера в 2004 году. За «передовые опыты с двумерным материалом – графеном» Константин Новоселов и Андрей Гейм в 2010 г. были удостоены Нобелевской премии. Для получения графена ученые использовали подручные материалы – кусок графита и обычный скотч. Ученые нанесли на липкую ленту небольшое количество графита, после чего ее много раз склеивали и расклеивали ленту, каждый раз разделяя (отшелушивая) вещество пополам. Эти действия ученые проводили до тех пор, пока от образца графита не остался один, последний – прозрачный слой – графен, который перенесли на подложку. Данный способ получения графена именуется методом “отшелушивания” [2].

На основе графена получены новые вещества: оксид графена, гидрид графена (называемый графан) и флюорографен (продукт реакции графена со фтором).

Оксид графена является производным графена. Соотношение C:O в пределах от 2,1 до 2,9.

Графан представляет собой гидрированное производное графена (гидрогенизированный графен). Это двумерный материал, в котором один атом углерода связан с одним атомом водорода и тремя атомами углерода. Его химическая формула $(\text{CH})_n$.

Флюорографен (или перфторуглерод, фторид графена) представляет собой фторуглеродное производное графена. Его химическая формула $\text{CF}_{1(1)}$

Свойства и преимущества графена [3]:

- графен является самым прочным материалом на Земле. В 300 раз прочнее стали, чем была бы самая прочная сталь той же толщины.
- благодаря двумерной структуре графена, он является очень гибким материалом
- в определённых условиях у графена активируется ещё одна способность, которая позволяет ему «залечивать» «дырки» в своей кристаллической структуре в случае её повреждений,
- графен обладает высокой электропроводностью и практически не имеет сопротивления. Подвижность зарядов графена составляет более $1,5 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.
- обладает высокой ёмкостью. Удельная энергоемкость графена приближается к $65 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$.
- обладает высокой теплопроводностью – около $5000 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$,
- характерна полная оптическая прозрачность. Он поглощает всего 2,3% света и оптически прозрачен в широком диапазоне от ультрафиолетового до дальнего инфракрасного излучения,
- графеновая плёнка пропускает молекулы воды и при этом задерживает все остальные, что позволяет использовать ее как фильтр для воды,
- самый легкий материал. В 6 раз легче пера,
- благодаря Броуновскому движению (тепловым колебаниям) атомов углерода в листе графена последний способен «производить» электрическую энергию,
- является основой для сборки различных не только самостоятельных двумерных материалов, но и многослойных двумерных гетероструктур,
- графен является гидрофобным и абсолютно непроницаем (за исключением воды) материалом для жидкостей и газов, в том числе агрессивных соединений,
- химически нейтрален, стабилен и экологичен,
- сильно поглощает свет всех видимых длин волн, что объясняет черный цвет графита. Тем не менее, один лист графена почти прозрачен из-за его крайней тонкости;
- инертен по отношению к кислотам и щелочам при комнатной температуре;
- не меняет свои электронные свойства при намагничивании;
- присутствие легирующих примесей отрицательно сказывается на электронных свойствах графена;

- обладает большой способностью распределять силу от удара, чем любой другой известный материал – в десять раз больше стали на единицу веса;
- горит при очень низкой температуре (например, 350 ° С или 620 K);

Таблица 1

Физические свойства графена*

Наименование показателя:	Значение:
Длина связи C–C, нм	0,142
Плотность, мг/м ²	0,763
Удельная площадь поверхности, м ² /г	2630
Подвижность электронов, см ² /(В·с)	более 1,0·10 ⁶
Модуль Юнга, ТПа	более 1
Теплопроводность, Вт/(м·К)	от 4840 до 5300
Оптическая прозрачность	0,977
Удельная прочность на растяжение, Н·м/кг	4,7·10 ⁷ – 5,5 ·10 ⁷
Удельная жесткость, Н·м/кг	0,45·10 ⁹

* при комнатной температуре

Основными способами получения графенового слоя на металлических поверхностях считаются [4]:

– Микромеханическое отшелушивание слоев графита (метод Новоселова – метод скотча). Образец графита помещали между лентами скотча и последовательно отшелушивали слои, пока не остался последний тонкий слой, состоящий из графена. Данный способ позволяет получать наиболее качественные образцы с высокой подвижностью носителей заряда. Этот способ не предполагает использования масштабного производства, поскольку данный способ является ручной процедурой.

Способ отшелушивания является довольно простым и гибким, поскольку позволяет работать со всеми слоистыми кристаллами, то есть теми материалами, которые представляются как слабосвязанные (по сравнению с силами в плоскости) слои двумерных кристаллов (двумерных материалов).

– Метод химического осаждения из паровой фазы (CVD). Является одним из самых популярных и эффективных методов нанесения графена на металлические поверхности является химическое осаждение из паровой фазы (CVD). Этот метод включает разложение углеродных предшественников (чаще всего метана) в присутствии катализатора (например, меди или никеля) при высокой температуре (около 1000°C). В результате углеродные атомы осаждаются на металлической поверхности, образуя графеновый слой. CVD обладает высокой степенью контроля над толщиной и качеством графенового слоя, что делает его идеальным для создания высококачественных графеновых пленок. Однако метод требует высоких температур и может быть ограничен использованием только некоторых металлов, таких как медь или никель.

– Метод жидкостного осаждения (LPE) графена представляет собой процесс, при котором графен осаждается из раствора на металлическую поверхность. В этом методе графен извлекается из графитовых источников с помощью ультразвукового воздействия или химических агентов, а затем осаждается на металлические подложки. Этот метод является менее сложным по сравнению с CVD и может быть применён для получения больших поверхностей графена. Однако качество осаждённого графена может быть ниже, чем в случае CVD, и этот метод часто требует дополнительных этапов для улучшения качества слоя.

– Метод лазерного абляции представляет собой процесс, при котором интенсивный лазерный луч используется для испарения углеродных материалов и осаждения графеновых слоёв на металлические подложки. Этот метод позволяет получить графен высокой чистоты с минимальными дефектами. Однако он требует дорогого оборудования и высокой точности в настройках лазера.

– Электрохимическое осаждение включает в себя использование электролита для осаждения углеродных материалов, которые затем перераспределяются в графеновую структуру. Этот метод может быть использован для получения графеновых пленок на металлических поверхностях при относительно низких температурах.

Таким образом, покрытия на основе графена стали перспективным решением для повышения коррозионной стойкости и износостойкости различных материалов. Уникальные свойства графена, включая его высокую химическую стабильность и механическую прочность, делают его идеальным материалом для покрытий. Покрытия на основе графена могут быть использованы для улучшения механических свойств металлов, повышения их устойчивости к коррозии и улучшения теплопроводности. Ожидается, что разработка покрытий на основе графена будет продолжать расти и в будущем приведет к появлению новых приложений.

В работе выполнен обзор физических свойств графена и методов его нанесения на металлические поверхности, которые являются важной областью исследований в современных наноматериалах. Каждый метод имеет свои особенности и может быть выбран в зависимости от требуемых характеристик графеновых слоёв и условий производства. В будущем, с развитием технологий и улучшением методов производства, можно ожидать широкое внедрение графеновых покрытий в различные отрасли, включая микроэлектронику, энергетику и защиту материалов.

Литература:

1. Кривцов А. М. Деформирование и разрушение твердых тел с микроструктурой. Москва: Физматлит, 2007.-304 с.
2. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S., Grigorieva I., Firsov A. Electric field effect in atomically thin carbon films // Science.. – 2004. – V. 306. – N. 5696. – P. 666–669.
3. Елецкий А. В. Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 3. С. 233–274.
4. Wu Z.S., Ren W., Gao L., Zhao J., Chen Z., Liu B., Tang D., Yu B., Jiang C., Cheng H.–M. Synthesis of graphene sheets with high electrical conductivity and good thermal stability by hydrogen arc discharge exfoliation // ACS nano. – 2009. – V. 3. – N. 2. – P. 411–417.

Increasing the wear resistance of metal surfaces by applying a graphene-based coating

Evtukh E.S.^{1,a} Evtukh G.E.^{1,b}

¹ Bryansk State Technical University, 7, 50 Let Oktyabrya Blvd, Bryansk, Russia

^a karmanova.helena@yandex.ru, ^b grishan32@mail.ru

Keywords: graphene, carbon atoms, metal surfaces, application methods, wear.

Friction and wear remain the main cause of mechanical energy dissipation and system failure. Recent research has shown that graphene can be a powerful material to combat this problem. Graphene, which is a single-layer lattice of carbon atoms, has become the object of intensive research due to its unique electrical, mechanical and thermal properties. In recent years, its integration with various materials, including metal surfaces, has attracted much attention in the context of the development of new functional materials and nanoelectronic devices. Graphene-based coatings have become a promising solution for improving the corrosion and wear resistance of various materials. This article discusses the main methods of graphene deposition on metal surfaces, their advantages and disadvantages, as well as application prospects.

УДК 691.175

Сравнение механических свойств полимерных матриц в зависимости от концентрации пластификатора

Кривлёва В. А.^{1,a}, Кустов А. В.^{1,b}

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

^a crivlyova@gmail.com, ^b alexkust@mail.ru

Ключевые слова: полимерные матрицы, термореактивные смолы, композиционные материалы, пластификатор.

Полимерные матрицы играют важную роль в современном мире, поскольку они используются в широком спектре прикладных задач, включая автомобилестроение, аэрокосмическую промышленность, строительство и многие другие области. Полимерные матрицы представляют собой связующие вещества, которые объединяют армирующие волокна в композитные материалы, придавая им необходимые физические и химические свойства. Существует несколько видов полимерных матриц, каждый из которых обладает своими уникальными характеристиками и применяется в определенных областях. Пластификаторы вводятся в состав полимеров для повышения их пластичности, гибкости и облегчения переработки. В данной статье рассматриваются основные типы полимерных матриц и пластификаторов, влияние пластификаторов на свойства полимеров, и сравниваются физико-механические свойства полимерных образцов с разной концентрацией содержания пластификатора.

Введение. Современное развитие автомобильной, авиационной и космической техники требует применения материалов с высокими удельными характеристиками прочности. Использование композиционных материалов на основе полимерных матриц и непрерывных углеродных или стеклянных волокон позволяет достичь снижения массы конструкций, но температура эксплуатации таких материалов ограничена термической стабильностью и термомеханическими свойствами полимерной матрицы.

Полимерную матрицу для композиционных материалов выбирают, учитывая условия эксплуатации изделий. От материала матрицы значительно зависят свойства композита: прочность, тепло- и влагостойкость, стойкость к действию агрессивных сред, а также метод получения изделия. Полимеры в качестве матрицы используют либо в чистом виде (порошки, гранулы, листы, пленки), либо в виде связующих (непрерывная фаза, обеспечивающая связанность отдельных элементов и сплошность материала как целого). В качестве матрицы для композиционных материалов чаще всего используются три класса полимеров: термореактивные смолы, термопласты и каучуки [1–3].

Термореактивные полимеры. В настоящее время около трех четвертей всех армированных пластиков производится на основе термореактивных матриц. Термореактивные полимеры – это смолы, которые легко образуют химические связи при отверждении. Отверждение осуществляется с помощью нагревания полимера или путем введения катализатора-отвердителя. К термореактивным относятся эпоксидные, полиэфирные, полиимидные и фенольные смолы. Отметим, что все они существуют во многих формах, могут иметь различную химическую структуру, различаться типом отвердителя и содержать различные наполнители, благодаря этому диапазон их свойств очень широк. По сравнению с термопластами, термореактивные смолы могут использоваться при более высоких температурах, поскольку у них более высокая температура размягчения и меньшая ползучесть [4].

Полиэфирные смолы. Полиэфирные смолы состоят из ненасыщенных (имеющих двойные связи между углеродными атомами) линейных полиэфиров, растворенных в стироле. Они относительно недороги, у них низкая вязкость – а это является достоинством при многих технологических процессах. Их недостатком является большая степень усадки при отверждении (4 ... 8%).

Эпоксидные смолы. Эпоксидные смолы дороже, но у них более высокая вязкость по сравнению с полиэфирами. Большим преимуществом эпоксидных смол является то, что у них может быть не одна, а несколько стадий отверждения. Это позволяет создавать препреги из слоев ткани или однонаправленных волокон, пропитанных частично отвержденной эпоксидной смолой. Препрег может храниться, обычно при отрицательных температурах, в течение достаточно долгого времени перед формованием детали и последующим доотверждением смолы. Как правило, усадка при отверждении эпоксидной смолы равна (1...5%). Их отверждение проводят с помощью полиамидных или полиаминных катализаторов. При этом активные группы отвердителя реагируют с эпоксидными или гидроксильными группами смолы, в результате чего образуется трехмерная полимерная сетка [2].

Фенольные смолы. Фенольные смолы появились раньше других термореактивных смол, однако благодаря низкой цене и неплохим свойствам широко применяются до сих пор. Смолы отверждают реакцией между фенолом и формальдегидом. Характеристики смолы зависят от соотношения реагентов и используемого катализатора. Один из главных недостатков фенольных смол заключается в выделении летучих продуктов при отверждении. Как следствие, чтобы избежать появления пор, при производстве приходится использовать высокое давление.

Полиимиды. Полиимиды дороже полиэфиров и эпоксидных смол, поэтому они используются менее широко. Основным достоинством полиимидов является их высокая теплостойкость. Полиимидная цепь сравнительно жестка благодаря наличию кольцевых структур. Кольца обуславливают также относительно низкий коэффициент теплового расширения и высокую теплостойкость полиимидов.

Пластификаторы. Основная функция пластификаторов заключается в снижении межмолекулярного взаимодействия между цепями полимера, что ведет к увеличению подвижности сегментов макромолекул. Это проявляется в повышении эластичности, снижении температуры стеклования и облегчении процесса переработки [5].

Основные типы пластификаторов:

1. Фталаты. Наиболее распространенные пластификаторы, используемые в ПВХ-материалах, они увеличивают гибкость и мягкость полимеров, делая их пригодными для производства пленок, труб и кабельной изоляции.

2. Адипинаты. Применяются в тех случаях, когда необходима высокая морозостойкость.

3. Тримеллитаты. Обеспечивают повышенную стойкость к высоким температурам и огню, что делает их популярными в автомобильной и авиационной промышленности.

4. Эфиры фосфорной кислоты. Используются там, где важны антипиренные свойства и устойчивость к горению, например, в электротехнических изделиях.

Влияние пластификаторов на свойства полимерных матриц:

1. Увеличение гибкости. Пластифицированные полимеры становятся более мягкими и податливыми, что облегчает их формование и уменьшает вероятность образования трещин при изгибе.

2. Снижение температуры стеклования. Введение пластификатора снижает температуру, при которой полимер переходит из твердого состояния в стеклообразное. Это позволяет использовать полимеры при более низких температурах без потери их механических свойств.

3. Облегчение переработки. Пластификация упрощает процессы экструзии, литья под давлением и каландрирования, что особенно важно при массовом производстве изделий из пластмасс.

4. Повышение химической стойкости. Некоторые пластификаторы улучшают устойчивость полимеров к действию растворителей, масел и других химических веществ.

Недостатком применения эпоксидных смол в качестве связующей основы для стекловолкна и материалов на его основе, является их высокая вязкость и жесткость конечной конструкции. Добавление в эпоксидные смолы ЭД-20, ЭД-16, специально разработанный смолы ДЭГ-1 позволяет полностью решить данную проблему — в результате реакции молекулы смолы ДЭГ-1 встраиваются в молекулярную решетку смеси, придавая тем самым необходимую эластичность стеклопластику. При этом молекулы смолы пластификатора не мигрируют из стеклопластика, что существенно продлевает срок службы изделия [6].

Эпоксидная смола ДЭГ-1 - представляет собой продукт конденсации эпихлоргидрина с диэтиленгликолем, содержит не менее 26% эпоксидных групп. Жидкость от светло-желтого до красно-коричневого цвета. Специально разработана и применяется как пластификатор и активный разбавитель для эпоксидных смол, и отлично с ней смешивается без нагрева, чем делает смолу менее вязкой. Допустимы различные пропорции смешивания, от 1 до 20% и более, но обычно в пределах 5-10%. Используя пластификатор ДЭГ-1, следует помнить, что при увеличении пластичности снижается механическая прочность изделия. Если отвердить смолу ДЭГ-1 в чистом виде, то получившийся после отверждения материал можно будет раскрошить руками.

Исследование свойств. В рамках исследования механических свойств полимерных матриц в зависимости от концентрации пластификатора были изготовлены образцы из эпоксидной смолы (ЭД-20), отвердителя (ТЭТА) и пластификатора (ДЭГ-1). Испытания образцов на сжатие и растяжение проводились на универсальной испытательной машине Eurotest T-50. Скорость перемещения траверсы при растяжении составляла 10 мм/сек.

Результаты, полученные из диаграмм «нагрузка-перемещение», которые выдает испытательная машина, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства образцов с разной концентрацией пластификатора

Исследуемые характеристики	Значение				
	ЭД-20 ТЭТА ДЭГ-1 (0%)	ЭД-20 ТЭТА ДЭГ-1 (5%)	ЭД-20 ТЭТА ДЭГ-1 (10%)	ЭД-20 ТЭТА ДЭГ-1 (15%)	ЭД-20 ТЭТА ДЭГ-1 (20%)
Плотность, кг/м ³	1142	1131	1174	1195	1132
Предел прочности при сжатии, МПа	29,5	52,9	79,3	85,2	73,5
Предел прочности при растяжении, МПа	10,1	19,1	29,4	28,2	27,7
Модуль упругости при сжатии, ГПа	10,5	9,5	8,3	6,8	4,7
Модуль упругости при растяжении, ГПа	4,6	5,3	6,1	6,3	4,9

Закключение. Образец с содержанием 15% пластификатора является наиболее прочным на сжатие и обладает большим показателем модуля упругости на растяжение. Так же можно выделить образец с содержанием 10% пластификатора, как самый прочный на растяжение. А образцом с лучшим показателем модуля упругости на сжатие оказался образец без пластификатора.

Пластификаторы являются важными компонентами полимерных матриц, позволяющими улучшить их технологические и эксплуатационные характеристики. Выбор правильного вида пластификатора зависит от конкретных требований к конечному продукту и условий его эксплуатации.

Литература:

1. Батаев А.А., Батаев В.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с.
2. Кулик В.И., А.С. Нилов Технология композитов на основе термореактивных полимерных связующих: учебное пособие; Балт. гос. техн. ун-т. – ЭСПб., 2019. – 136 с.
3. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы: учебное пособие – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118 с.
4. Вернигорова В.Н., Саденко С.М. Материаловедение полимеров и композиционных материалов на их основе: монография – Пенза: ПГУАС, 2013. – 420 с.
5. G. Wypych, Handbook of Plasticizers: Third edition. Elsevier. 2017. Vol. 858.
6. SammaS – Сам мастер! Все о стекломатериалах // Пластификаторы [электронный ресурс]. URL: <https://samm.ru/spravochnik-materialov/smoly/plastifikatory/all-pages.html> (дата обращения: 02.03.2025)

Comparison of mechanical properties of polymer matrices depending on plasticizer concentration

Krivleva V. A.^{1,a}, Kustov A. B.^{1,b}

¹Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, Russian Federation, 660037, Krasnoyarsk, prosp. them. gas. "Krasnoyarsk worker", 31

^acrivlyova@gmail.com, ^balexkust@mail.ru

Key words: polymer matrices, thermosetting resins, composite materials, plasticizer.

Polymer matrices play an important role in today's world as they are used in a wide range of applications including automotive, aerospace, construction and many other fields. Polymer matrices are binders that combine reinforcing fibers into composite materials, giving them the required physical and chemical properties. There are several types of polymer matrices, each with its own unique characteristics and applications. Plasticizers are introduced into polymers to increase their ductility, flexibility and facilitate processing. This article discusses the main types of polymer matrices and plasticizers, the effect of plasticizers on polymer properties, and compares the physical and mechanical properties of polymer samples with different concentrations of plasticizer content.

УДК 629.78.023.2

Исследование свойств композиционного материала с борными волокнами

Кривлёва В. А.^{1,a}, Кустов А. В.^{1,b}

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

^acrivlyova@gmail.com, ^balexkust@mail.ru

Ключевые слова: композиционные материалы, борное волокно, бор, намотка, прочность.

Данное исследование направлено на изучение свойств композиционного материала с борными волокнами. Бор является прочным и легким материалом, что делает его привлекательным для использования в композитах. Борные волокна получают путем осаждения бора на тонкие нити или проволоки, обычно вольфрамовые, методом

химического осаждения из газовой фазы. Однако их применение ограничено из-за высокой стоимости и температурных ограничений. Высокая прочность, термостойкость, улучшенные тепловые и электрические свойства делают их крайне актуальными для современного производства. Потенциальные области применения таких материалов включают аэрокосмическую, автомобильную, электротехническую и химическую отрасли. В данном исследовании было изготовлено несколько опытных образцов, которые были испытаны на растяжение, а полученные результаты сравнивались между собой.

Введение. Борные волокна являются одним из перспективных армирующих композиционных материалов с полимерной и металлической матрицами. Они характеризуются высокой прочностью, твердостью и малой склонностью к разрушению при повышении температуры. Изготовление борного волокна — сложный и многоступенчатый процесс, который требует высокого уровня технологического мастерства и специальных условий. Их производят в реакторе, разложением хлорида и бромиды бора в среде водорода с последующим осаждением бора из газовой среды на горячей вольфрамовой нити диаметром примерно 12 мкм (рис. 1). Для получения высококачественного волокна требуется очень точно соблюдать технологические режимы в реакторе [1, 2].

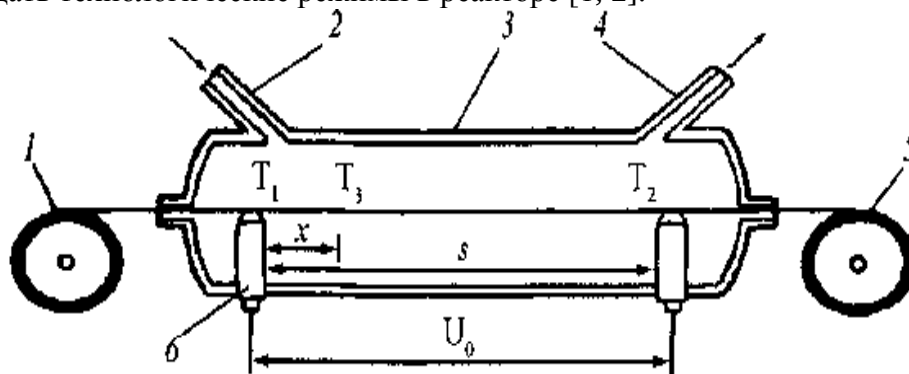


Рис. 1. Схема реактора для получения борного волокна:
1 — подающий барабан; 2 — штуцер для подачи газовой смеси; 3 — камера осаждения; 4 — штуцер для удаления газов; 5 — приемный намоточный барабан; 6 — электрод; U_0 — потенциал, необходимый для нагревания нити; s — расстояние между электродами

Поверхность борных волокон имеет зернистую структуру, что является результатом того, что в процессе получения волокон первоначально бор осаждается на активных центрах (зародышах осаждения), имеющихся на поверхности вольфрамовой подложки. Затем осаждение происходит послойно с образованием зерен, размеры которых постепенно увеличиваются, что приводит к их смещению с четким проявлением границ раздела (рис. 2).

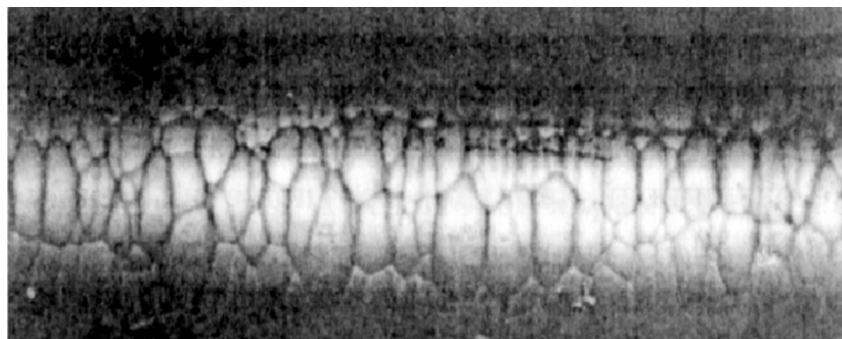


Рис. 2. Структура борного волокна под микроскопом

Использование композиционных материалов. Одним из основных применений борного волокна является авиация и космическая техника. Борное волокно обладает исключительно высокими показателями прочности на растяжение и жесткости, что делает его идеальным для использования в конструкциях, испытывающих огромные механические

нагрузки. Например, в космической технике оно часто применяется для армирования композитных материалов, таких как углепластики. Благодаря этому удается создать легкие и одновременно сверхпрочные элементы конструкции, такие как обшивка корпуса, ребра жесткости и даже элементы солнечных батарей.

Хотя стеклопластики успешно применяются в авиации в обшивках и обтекателях самолетов и в других (второстепенных) конструкциях, но они не могут быть использованы в основных несущих нагрузку узлах из-за своей недостаточной жесткости. Поэтому появление высокопрочных высокомодульных волокон, обладающих низкой плотностью, и композиционных материалов на их основе позволило изменить многие конструкции в авиастроении.

Борное волокно также активно используется в производстве элементов ракетных двигателей. Высокая термостойкость и механическая прочность позволяют применять его в соплах, форсунках и других деталях, работающих в условиях высоких температур и давления. Такие компоненты обеспечивают надежность работы двигателя в течение длительного времени эксплуатации.

Борное волокно сложно использовать, если поверхность исходного материала имеет контурную форму, но из них можно формировать пропитанные смолой ленты для ручной укладки и намотки нитей. С борным волокном часто используется эпоксидная матрица. Высокая стоимость борных нитей значительно ограничила их использование [3].

Исследование свойств. В рамках исследования испытания образцов на растяжение проводились на универсальной испытательной машине Eurotest T-50. Скорость перемещения траверсы при растяжении составляла 10 мм/сек.

Первым образцом для испытаний была «косточка» из эпоксидной смолы ЭД-20 с использованием отвердителя ТЭТА без борных волокон массой 7,06 г и размерами 11х3,8 мм, для последующего сравнения результатов. Испытательной машиной была получена диаграмма «нагрузка-перемещения», по которой выяснили, что образец выдержал нагрузку на растяжение в 0,7853 кН и полученный образец имеет прочность 18,786 МПа.

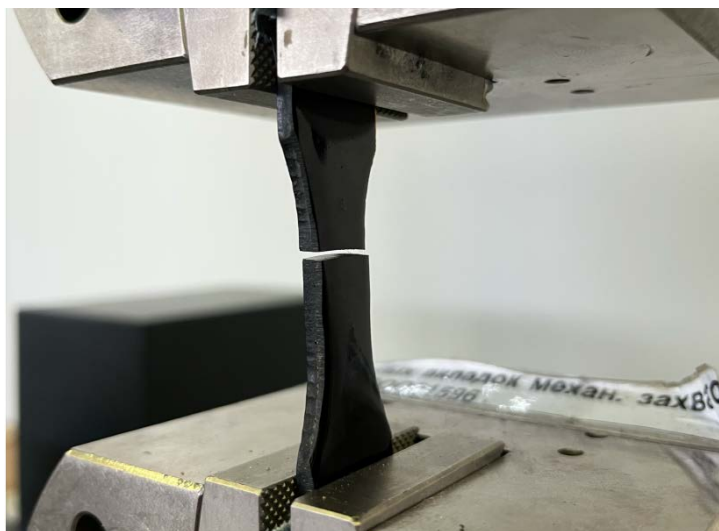


Рис. 3. Первый образец после испытания на растяжение

Для получения второго образца в тщательно очищенную силиконовую форму ручной формовкой было выложено борное волокно, после чего было залито смесью смолы ЭД-20 и отвердителя ТЭТА (рис. 4). Полученная «косточка» из борного волокна и смолы с размерами 4х11,5 мм имела массу 7,28 г. По полученной диаграмме «нагрузка-перемещения», определили, что образец выдержал нагрузку на растяжение в 1,6422 кН и полученный образец имеет прочность 35,700 МПа.



Рис. 4. Выкладка борного волокна в форму «косточки»

Третий образец был получен с помощью намотки борных волокон на специальную форму с использованием эпоксидной смолы ЭД-20 и отвердителя ТЭТА. После того, как смола полимеризовалась, полученный композиционный материал был снят с формы и разделен на пластинки. Одну из полученных пластинок положили в силиконовую форму «косточки» и залили недостающей смолой (рис. 5).



Рис. 5. Опытный образец, полученный в результате намотки волокон

Полученный образец, массой 8,65 г и размерами 4x11 мм, был так же испытан на разрыв. Машина выдала следующие результаты испытания: максимальная нагрузка достигла 2,6562 кН, а прочность образца стала 60,367, что превышает прошлый образец с борным волокном в 1,69 раз.

Закключение. В ходе испытаний было выяснено, что образец, полученный при намотке, является более прочным (прочность равна 60,367 МПа) и выдерживает большие нагрузки (максимальная нагрузка 2,6562 кН), чем образец, выложенный ручным методом.

Борные волокна на сегодняшний день остаются одним из наиболее востребованным армирующим материалом с высокими механическими характеристиками, работающим при сжатии и растяжении. Основная масса произведенных волокон идет на изготовление лент и препрегов с эпоксидной смолой в качестве матрицы.

Использование борных волокон в композитах позволяет обеспечивать высокий уровень прочностных, усталостных характеристик и высокое значение модуля упругости, а их полупроводниковые свойства приводят к понижению тепло- и электропроводности. Успехи, с которыми боропластики стали применяться в композиционных материалах для авиастроения, сделали их предвестниками целого нового и уникального класса композитов с высокими физико-механическими свойствами [4].

Литература:

1. Коганова И.И. Механика композиционных материалов. Армирующие волокна : учебно-методическое пособие. — Саров : СарФТИ, 2016. — 24 с.
2. Bunsell A. R. Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres, Second Edition. Woodhead Publishing: Sawston, UK, 2018. Vol. 1099. P. 929 – 991.
3. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. Санкт-Петербург : НОТ, 2009. — 380 с. — ISBN 978-5-91703-009-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/4297> (дата обращения: 24.02.2025).
4. Современные технологии производства [электронный ресурс]. URL: <https://extxe.com/30125/bornye-i-drugie-vysokoprochnye-vysokomodulnye-armirujushhie-volokna/> (дата обращения 24.02.2025).

Research of properties of composite material with boron fibers

Krivleva V. A.^{1,a}, Kustov A. B.^{1,b}

¹Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, Russian Federation, 660037, Krasnoyarsk, prosp. them. gas. "Krasnoyarsk worker", 31

^a crivlyova@gmail.com, ^b alexkust@mail.ru

Key words: composite materials, boron fiber, boron, winding, strength.

This research is aimed at studying the properties of composite material with boron fibers. Boron is a strong and lightweight material, which makes it attractive for use in composites. Boron fibers are produced by depositing boron on thin filaments or wires, usually tungsten, by chemical vapor deposition. However, their application is limited due to high cost and temperature limitations. Their high strength, heat resistance, improved thermal and electrical properties make them highly relevant for modern manufacturing. Potential applications of such materials include aerospace, automotive, electrical and chemical industries. In this research, several prototypes were fabricated, tensile tested and the results were compared with each other.

УДК 691.175

Исследование механических свойств стеклопластиковых композиционных материалов, полученных методом контактного формования

Зырянов Е. Ю.^{1,a}, Кустов А. В.^{1,b}

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

^a zyrianov.evgeny@yandex.ru, ^b alexkust@mail.ru

Ключевые слова: композиционные материалы, контактное формование, стеклопластики, механические свойства.

В данной статье рассматривается контактное формование — широко используемый метод производства полимерных композиционных материалов в различных отраслях. Описана суть метода: укладка и пропитка армирующего материала полимерной смолой в форме с последующим уплотнением. Выделены основные варианты контактного формования (ручное, автоматизированное, напыление) и два типа форм: позитивные и негативные, определяющие качество поверхности изделия. Подробно описан процесс формования с использованием негативной формы, включая элементы схемы: форма, разделительное покрытие, гелькоат, стекловолоконистый наполнитель, валик, смола с катализатором. Подчеркивается важность выбора материала формы, нанесения разделительного покрытия для предотвращения прилипания и обеспечения успешного отделения изделия. Обозначены ключевые параметры, влияющие на качество отделения: материал формы, гладкость поверхности и скорость высыхания разделительного покрытия. Описывается необходимость подготовки формы, включая нанесение гелькоута и укладку слоев стеклоткани с удалением воздуха. Отмечены преимущества и недостатки ручной формовки, такие как простота, низкая стоимость, возможность создания сложных форм, но требующие опыта и времени.

Введение. При производстве полимерных композиционных материалов очень широко используется контактное формование. Контактное формование — это способ, применяемый в самых разных областях, от лодок и автомобилей до космической техники. Суть метода заключается в том, что слои армирующего материала укладываются в форму, пропитываются полимерной смолой, а затем уплотняются для удаления воздуха. Пропитка армирующего материала может происходить как до, так и после его укладки в форму. Существует три основных варианта контактного формования: ручной, автоматизированный и метод напыления. Основным инструментом в этом процессе является форма, которая может быть двух видов: позитивная и негативная. Позитивная форма обеспечивает гладкую и точную внутреннюю поверхность готового изделия, в то время как негативная форма позволяет получить высокое качество наружной поверхности. [1].

Описание метода. На (рис. 1) показано устройство полимерного композитного изделия, изготовленного с использованием негативной формы. При таком методе точные размеры и гладкая поверхность получаются только у той части изделия, которая непосредственно контактирует с формой во время производства.

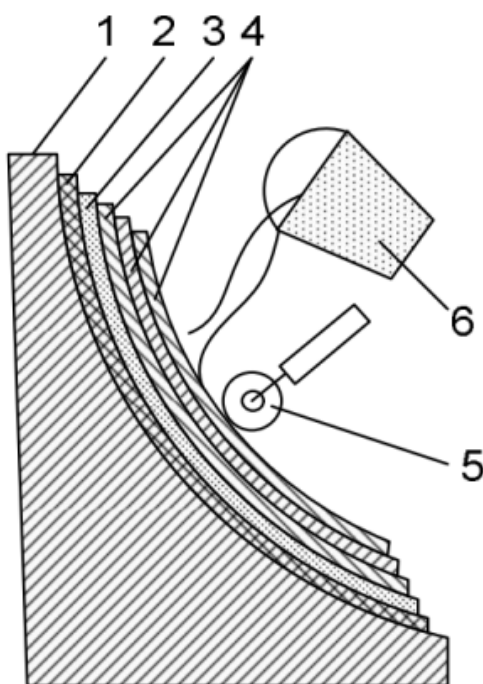


Рис. 1. Элементы конструкции формы и изделия при формовании ручной укладкой
1 – форма; 2 – разделительное покрытие; 3 – наружный смоляной слой; 4 – стекловолокно;
5 – ручной валик; 6 – связующее

Основными элементами схемы, приведенной на (рис. 1), являются форма, разделительное покрытие, наружный смоляной слой (гелькоат), три слоя стекловолокнистого наполнителя, ручной валик и смола в смеси с катализатором. Поверхность формы должна отвечать требованиям геометрии, жесткости, адгезии. Для изготовления формы могут быть использованы такие материалы, как дерево, фанера, металл, бетон, гипс, стеклопластик и др.

Для того чтобы связующее не прилипало к поверхности формы, используют специальные разделительные покрытия. Однако если связующее попадет на поверхность формы, изделие прилипнет к форме. Прилипание приведет к образованию дефектов на поверхности изделия и порче самой формы. Особенно это касается форм, выполненных из пористых материалов – дерева, гипса и др. Поэтому поверхность формы обрабатывается парафином, воском или другим материалом, препятствующим схватыванию формы с формируемым изделием [2].

Успешное отделение изделия от формы определяется тремя ключевыми параметрами: из чего сделана форма, насколько гладкая её поверхность и как быстро высыхает

разделительное покрытие. Чтобы изделия получались качественными, форму нужно полировать и наносить свежий слой разделительного воска (парафина) после каждой отливки. Подготовка формы включает нанесение гелькоута поверх разделительного слоя, а затем укладку трёх слоёв стеклоткани для армирования. Важно, чтобы при пропитке стеклоткани не образовывались пузырьки воздуха, для этого используют щётки и валики. Если используются термореактивные смолы, изделие должно оставаться в форме до полного затвердевания. Ручная формовка — простой и недорогой способ создания изделий сложной формы, но он требует опытного работника и занимает много времени [3].

Помимо ручного формования, существует ещё несколько вариантов контактного формования, различающихся степенью автоматизации и используемым оборудованием. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки, определяющие его применимость в зависимости от объёмов производства, сложности изделия и требований к качеству:

• **Автоматизированное формование:** позволяет значительно повысить производительность и стабильность качества по сравнению с ручным формованием. В этом процессе некоторые или все этапы производства автоматизированы с использованием роботизированных систем и специализированного оборудования. К преимуществам можно отнести: высокую производительность, стабильность качества и снижение трудозатрат. Недостатками будут являться: высокая стоимость оборудования, наличие квалифицированного персонала и ограниченная гибкость форм [4].

• **Метод напыления (Spray-up):** это разновидность контактного формования, при котором рубленые волокна армирующего материала и смола одновременно напыляются на форму с помощью специального оборудования — распылителя (chopper gun). Волокна, проходя через распылитель, измельчаются и смешиваются со смолой, после чего смесь наносится на поверхность формы [5-6].

Исследование свойств (эксперимент). Для нашего исследования было взято следующее оборудование: Эпоксидная смола ЭД – 20, и 3 вида стеклоткани (советская, российская, китайская). Получение пластины из КМ методом ручного формования производилось по следующим этапам:

1. Выбор материалов;
2. Нарезка необходимое количество заготовок (110 x 110 мм);
3. Приготовление 40 г. эпоксидной композиции;
4. Подготовка поверхности для композитной ткани: очистка, нанесение воска.
5. Укладка листа на поверхность, пропитанную связующим.
6. Приглаживание ткани до появления следов смолы на поверхности ткани.
7. Нанесение дополнительного количества связующего и покрытие сухой ткани.
8. Полученный результат для отверждения оставляем в сухом месте на 24 часа.
9. После отверждения полученный пакет, обрезаем до размеров 100×100 мм.
10. Определяем вес получившегося изделия.
11. Рассчитываем вес и плотность полученного КМ, по правилу механической смеси.
12. Пластины с помощью ножовки распиливаем на полоски шириной 10±0,5 мм.
13. При помощи разрывной машины определяем растяжение и рассчитываем модуль упругости материала.
14. Сравниваем рассчитанные величины с экспериментальными. Находим отклонение.

Таблица 1

Результаты испытаний при растяжении (основа/уток)

Стеклоткань	h, мм	b, мм	H, кН	δ , мм	σ , МПа	m, гр.	ρ , г/см ³
Российская	1,19/1,42	10	1,16/2,60	6,69/7,65	96,71/222,85	20,571	1,444
Советская	0,30/0,58	10	1,64/1,78	5,69/4,97	524,80/548,77	9,495	1,643
Китайская	1,36/1,45	10	2,20/3,57	5,35/7,77	156,88/365,76	20,858	1,438

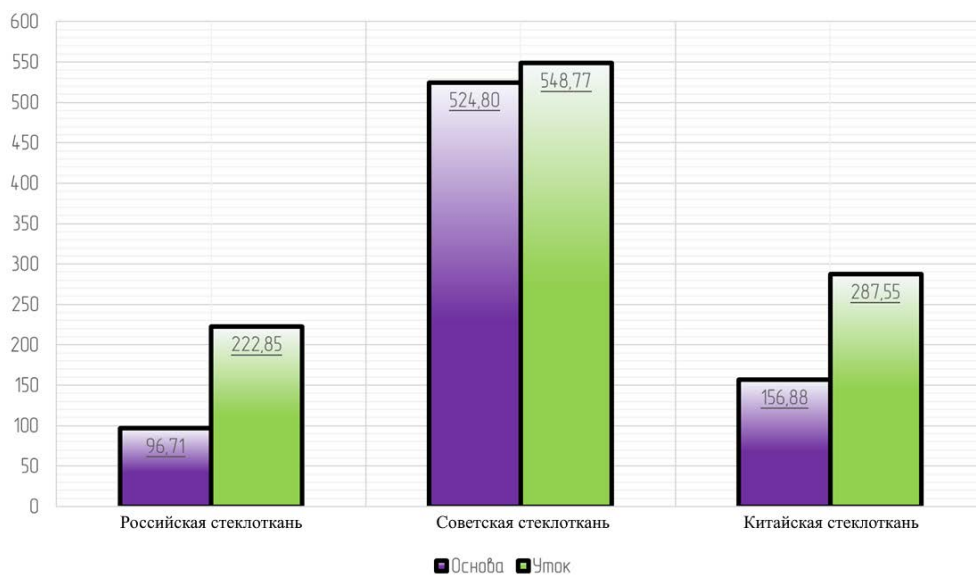


Рис. 2. Предел прочности при растяжении для образцов, МПа

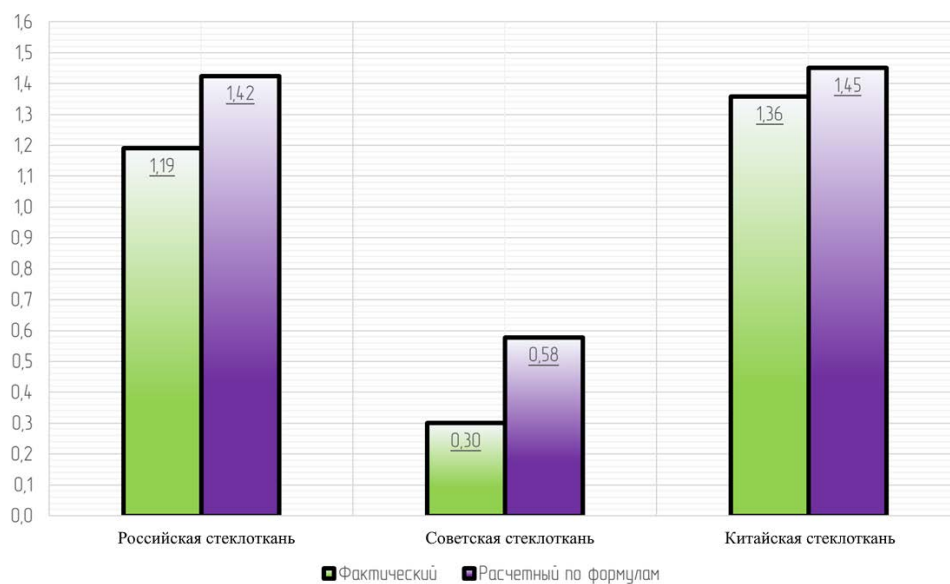


Рис. 3. Толщина образцов, мм

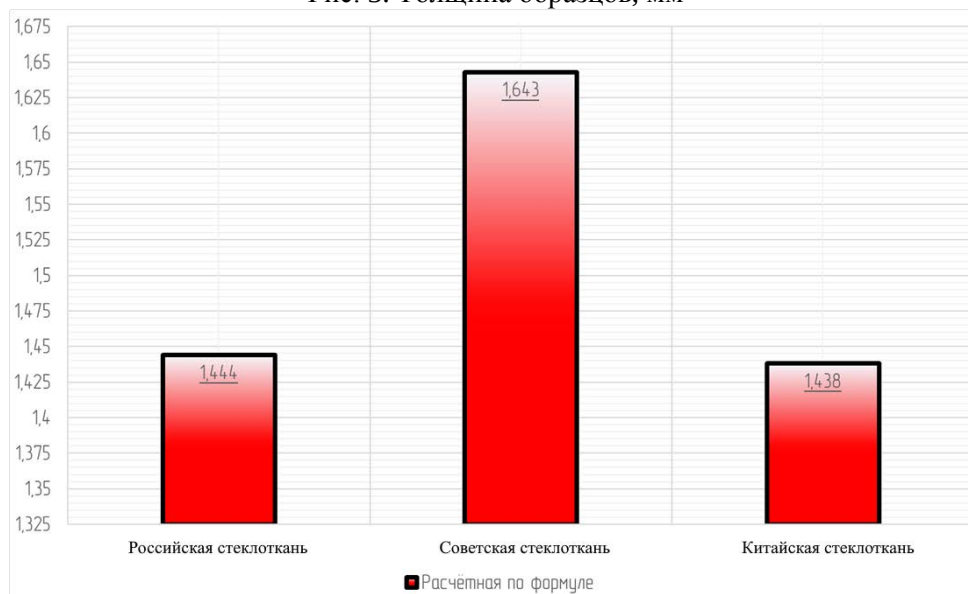


Рис. 4. Плотность образцов, г/см³

Заключение. Исходя из экспериментальных и расчётных данных, наиболее прочным оказался композиционный материал который состоял из двух слоёв советской стеклоткани, однако он имеет наибольшую плотность. Стеклопластики китайского и российского производства оказались сравнительно равными по прочностным характеристикам, с равной на величину погрешности плотностью и толщиной.

Литература:

1. Особенности контактного формования композитов [Электронный ресурс]. URL: <https://3dprintspb.com/kontaktnoe-formovaniya-kompozitov/> (дата обращения: 24.02.2025).
2. ХИМСНАБ КОМПОЗИТ. Технология контактного формования. [Электронный ресурс]. URL: <https://igc-market.ru/baza-znaniy/tekhnologii/tekhnologiya-kontaktnogo-formovaniya/> (дата обращения: 24.02.2025).
3. ООО «ПЛАСТПОЛИЭФИР». Контактное (ручное) формование. [Электронный ресурс]. URL: <https://plastpolifir.ru/technology/1/description/15> (дата обращения: 24.02.2025).
4. SMC | Автоматическая линия формовки композитных материалов [Электронный ресурс]. URL: <https://robbyline.by/product/smcavtomaticheskaya-liniya-formovki-kompozitnyh-materialov/> (дата обращения: 15.03.2025).
5. Springer Nature Link / Investigation of the mechanical, thermal and dielectric properties of electrical corrosion resistance glass reinforced polyimide-based composite produced by spark plasma sintering. [Электронный ресурс]. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10854-024-12085-7> (дата обращения: 15.03.2025).
6. Композитные материалы и технологии производства: Подробное руководство URL: https://kmp-magazin.ru/index.php?route=revolution/revblog_blog&revblog (дата обращения: 15.03.2025).

Study of mechanical properties of glass-reinforced plastic composite materials produced by contact molding method

Zyryanov E. Yu.^{1,a}, Kustov A. B.^{1,b}

¹Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, Russian Federation, 660037, Krasnoyarsk, prosp. them. gas. "Krasnoyarsk worker", 31

^azyryanov.evgeny@yandex.ru, ^balexkust@mail.ru

Key words: composite materials, contact mounding, glass plastics, mechanical properties.

This article deals with contact molding, a widely used method of production of polymer composite materials in various industries. The essence of the method is described: laying and impregnation of reinforcing material with polymer resin in a mold with subsequent compaction. The main variants of contact molding (manual, automated, spraying) and two types of molds: positive and negative, which determine the quality of the product surface, are highlighted. The process of molding using negative mold is described in detail, including the elements of the scheme: mold, release coating, gelcoat, glass fiber filler, roller, resin with catalyst. The importance of mold material selection, release coating application to prevent sticking and ensure successful product separation is emphasized. Key parameters affecting the quality of separation are outlined: mold material, surface smoothness and the drying rate of the release coating. The need for mold preparation, including the application of gelcoat and the placement of air-entrained layers of glass fabric, is described. The advantages and disadvantages of hand molding are noted, such as simplicity, low cost, and the possibility of creating complex molds, but requiring experience and time.

УДК 691.175

Исследование свойств композиционных материалов из стеклопластика, полученных методом вакуумной инфузии

Зырянов Е. Ю.^{1,a}, Кустов А. В.^{1,b}

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

^azyrianov.evgeny@yandex.ru, ^balexkust@mail.ru

Ключевые слова: композиционные материалы, вакуумная инфузия, крупногабаритные изделия.

В статье рассматривается применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) и перспективная технология вакуумной инфузии для их производства. ПКМ, благодаря своим выдающимся свойствам, находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Вакуумная инфузия, как один из методов закрытого безавтоклавного формования, позволяет получать изделия разных размеров и конфигураций. Метод заключается в заполнении жидким связующим пористой армирующей ткани под вакуумом с последующим отверждением смолы. Описывается процесс, технологический пакет и используемое оборудование. В статье также указывается на важность выбора связующего с учётом его стабильности при низком давлении, а также рассматриваются преимущества вакуумной инфузии, такие как высокая концентрация армирующих элементов, низкая пористость и отсутствие необходимости в дорогостоящем оборудовании. Однако отмечаются и недостатки, такие как сложность разработки стратегий инфузии для крупногабаритных деталей и потребность в высококвалифицированных специалистах.

Введение. Полимерные композиционные материалы (ПКМ), благодаря своим уникальным свойствам, находят всё большее применение, например можно выделить такие области:

- **Аэрокосмическая промышленность:** производство легких и прочных компонентов для самолетов (крылья, фюзеляж), вертолетов, космических аппаратов. Точность и высокое качество поверхности имеют решающее значение.

- **Судостроение:** строительство корпусов яхт, лодок, катеров. Необходимо высокое соотношение прочности к весу и устойчивость к воздействию морской воды.

- **Автомобилестроение:** производство кузовных панелей, деталей интерьера, спортивных автомобилей. Важны низкий вес, высокая прочность и эстетика.

- **Энергетика:** Лопасти ветрогенераторов (длина лопастей может достигать десятков метров), что требует высокой прочности и лёгкости.

- **Строительство:** Производство композитных конструкций для мостов, зданий.

- **Спортивные товары:** велосипеды, лыжи, сноуборды, теннисные ракетки, детали для гоночных автомобилей.

Методы получения этих материалов в изделия разнообразны, включая производство деталей различных размеров и конфигураций. Особенно выделяются технологии закрытого безавтоклавного формования, такие как вакуумная пропитка и инфузия. Они не только повышают производительность и мобильность производственных процессов, но и существенно сокращают расходы на дорогостоящее прессовое и автоклавное оборудование. Эти инновации делают ПКМ ещё более привлекательными для широкого спектра отраслей

промышленности, обеспечивая высокую надёжность и экономичность конечных продуктов [1].

Описание метода. Вакуумная инфузия в настоящее время является наиболее перспективной технологией получения композитов. Процесс вакуумной инфузии заключается в заполнении жидким связующим пор в предварительно откакумированном армирующем материале.

После пропитки происходит отверждение жидкой смолы с образованием жесткой полимерной матрицы, обуславливающей равномерное распределение нагрузки в композитном изделии. Типичными армирующими материалами являются стеклоткань и углеродная ткань. В качестве связующего могут применяться эпоксидные, полиэфирные, эпоксивицилэфирные и др. связующие (рис. 1).

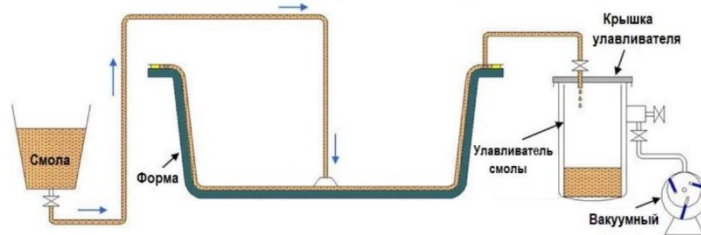


Рис. 1. Технология вакуумной инфузии. Оборудования и процесс.

При подборе связующего важно учитывать уровень вакуума, при котором оно может начать кипеть. Например, стирол, присутствующий в большинстве полиэфирных смол, закипает уже при комнатной температуре, если давление внутри вакуумного пакета падает ниже 50 мм ртутного столба. В отличие от этого, эпоксидные смолы остаются стабильными даже при давлении всего в 1 мм рт. ст. Также нужно удостовериться, что в составе связующего отсутствуют растворители, способные закипать во время инфузии, вызывая образование пор и снижая прочность готового изделия.

Технологический пакет для вакуумной инфузии, как правило, включает следующие слои, изображенные на рисунке:

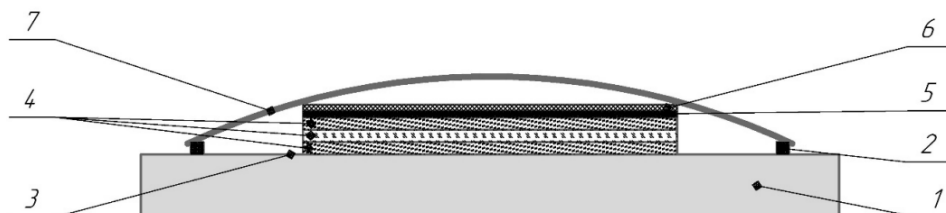


Рис. 2. Технологический пакет для вакуумной инфузии

1 – оснастка; 2 – герметизирующий жгут; 3 – антиадгезионное покрытие; 4 – слои сухой стеклоткани; 5 – жертвенная ткань; 6 – проводящая сетка; 7 – вакуумная плёнка

Ключевыми технологическими факторами, влияющими на качество конечного изделия, является:

1. Герметичность пакета;
2. Уровень вакуума;
3. Вязкость смолы;
4. Время гелирования смолы;
5. Правильное распределение смолы с помощью проводящих сеток;
6. Аккуратная выкладка слоев ткани и вспомогательных материалов.

Использование вакуумной инфузии для производства композитных изделий имеет несколько преимуществ: высокая концентрация армирующих элементов в конечном продукте; низкий уровень пористости; отсутствие необходимости использовать препреги с коротким сроком годности; неограниченное время на установку и сборку вакуумного мешка; отсутствие нужды в дорогостоящем оборудовании вроде автоклавов, прессов или

инжекторов; возможность создавать крупные детали единым целым, без разбиения на составляющие [2].

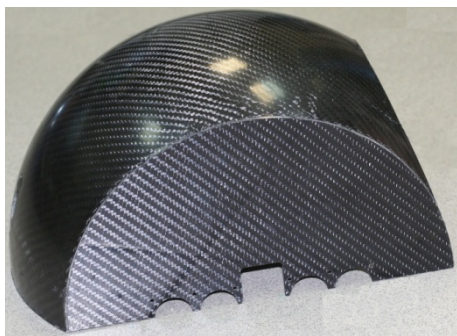
Исследование свойств. Однако серьезным минусом остается трудность разработки стратегий инфузии для крупногабаритных деталей и большое количество необходимых материалов, что увеличивает стоимость производства. К тому же требуются высококвалифицированные специалисты.

Тем не менее, достоинства этой методики пока делают её незаменимой, потому что:

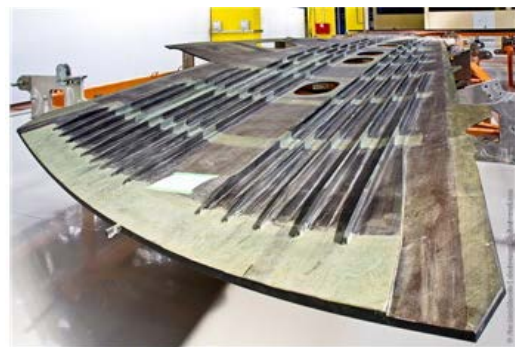
- Она позволяет изготавливать большие изделия с нужными прочностными характеристиками без необходимости разделять их на части;
- Обеспечивает высококачественную и равномерную пропитку материалов, уменьшая необходимое количество связующего;
- Полученные изделия имеют оптимальное соотношение волокна и связующего, что делает их легкими и одновременно прочными (особенно тонкостенные детали);
- Возможно создание идеально гладких поверхностей независимо от размера и сложности формы;
- Обеспечивается безопасность для здоровья работников за счет минимизации контакта с вредными химикатами [3].

Текущие разработки: в настоящее время ведутся разработки во множестве научных отраслей на уровне целых сфер и химерических процессов:

- **Автоматизация процесса инфузии:** разработка роботизированных систем и автоматизированных линий для повышения производительности, снижения трудозатрат и повышения повторяемости процесса.
- **Оптимизация стратегий инфузии:** разработка программного обеспечения и алгоритмов для моделирования процесса инфузии и прогнозирования оптимальных параметров (расположение впускных и выпускных отверстий, скорость инфузии) для сложных форм.
- **Улучшение скорости и эффективности инфузии:** разработка новых методик для ускорения процесса (например, применение тепла или вибрации), а также для улучшения пропитки толстых слоев армирующего материала.
- **Комбинированные процессы:** исследование интеграции вакуумной инфузии с другими технологиями, такими как 3D-печать, для создания сложных и функциональных композитных изделий [4-5].



а)



б)

Рис. 3. Крупногабаритные изделия, полученные методом вакуумной инфузии
а – обтекаемая модель, б – направляющие

Заключение. Технологии инфузионного формования ПКМ становятся всё более популярными, особенно при производстве крупногабаритных изделий. Постоянно ведутся работы по усовершенствованию данного метода.

В процессе изготовления интегрированных конструкций, таких как панели крыльев с внутренней поддержкой (стрингеры), сначала производится предварительная формовка стрингеров. Затем выполняется последовательная пропитка заготовок обшивки вместе со стрингерами, после чего происходит отверждение в термопечи.

Чтобы обеспечить надежное вакуумирование и герметизацию рабочих полостей во время инфузии, применяют двойные вакуумные мешки. Это повышает качество пропитки и последующего отверждения конструкции [6].

Литература:

1. Опыт применения вакуум-инфузионных технологий в производстве конструкций из ПКМ [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-primeneniya-vakuum-infuzionnyh-tehnologiy-v-proizvodstve-konstruktsiy-iz-pkm/viewer> (дата обращения: 10.03.2025).
2. Институт новых углеродных материалов и технологий [Электронный ресурс]. URL: <http://www.inumit.ru/rus/biblioteka/vakuumnaya-infuziya/> (дата обращения: 10.03.2025).
3. Технология — вакуумная инфузия [Электронный ресурс]. URL: <https://comcarbo.ru/news/tekhnologiya-vakuumnaya-infuziya/> (дата обращения: 10.03.2025).
4. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-infuzii-dlya-izgotovleniya-polimernyh-kompozitsionnyh-materialov-obzor-chast-2/viewer> (дата обращения: 10.03.2025).
5. Springer Nature Link / Fabrication of Fibre-Reinforced Composites Using Vacuum Infusion Process and Testing https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-7971-2_44 [Электронный ресурс]. URL: (дата обращения: 10.03.2025).
6. Композитный мир / Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов. [Электронный ресурс]. URL: <https://compositeworld.ru/articles/tech/id62e2442e26cedd0012bb776d> (дата обращения: 10.03.2025).

Investigation of properties of fibreglass composite materials produced by vacuum infusion method

Zyryanov E. Yu.^{1,a}, Kustov A. B. ^{1,b}

¹Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, Russian Federation, 660037, Krasnoyarsk, prosp. them. gas. "Krasnoyarsk worker", 31

^azyryanov.evgeny@yandex.ru, ^balexkust@mail.ru

Key words: composite materials, vacuum infusion, large-size products.

The article deals with the application of polymer composite materials (PCM) and promising vacuum infusion technology for their production. PCMs, due to their outstanding properties, are widely used in various industries. Vacuum infusion, as one of the methods of closed non-autoclave moulding, allows to produce products of different sizes and configurations. The method consists in filling a porous reinforcing fabric under vacuum with a liquid binder and subsequent curing of the resin. The process, the technological package and the equipment used are described. The article also points out the importance of selecting a binder considering its stability at low pressure, and discusses the advantages of vacuum infusion such as high concentration of reinforcing elements, low porosity and no need for expensive equipment. However, disadvantages such as the difficulty of developing infusion strategies for large-sized parts and the need for highly skilled labour are also highlighted.

УДК 624.042.5; 536.3

Исследование температурного поля при лазерном упрочнении сталей

Веремейчик А.И.^{1,a}, Холодарь Б.Г.^{1,b}¹Брестский государственный технический университет, ул. Московская, 267, Брест, 224017, Беларусь^avai_mrtm@bstu.by, ^bhbg@list.ru

Ключевые слова: упрочнение, температурное поле, лазер, сканирующая система, пятно, луч.

Исследована кинематика движения пятна нагрева при лазерном упрочнении сталей сканирующим лучом, теоретически определены размеры зон «пятно-промежуток» для различных скоростей движения лазерной головки. Для решения задачи теплопроводности используется метод мгновенно-приложенного точечного источника (функций Грина) при соответствующем интегрировании воздействия по площади пятна нагрева. Разработан алгоритм и компьютерная программа расчета температурного поля при лазерном упрочнении сталей.

Введение. Воздействие движущегося теплового потока высокой интенсивности используется для модификации свойств материала в приповерхностной зоне. Задачей воздействия является целенаправленное изменение фазового состава материала и его микроструктуры, что в свою очередь приводит к требуемому изменению механических свойств материала. При этом основным вопросом является подбор оптимального режима теплового нагружения, который зависит прежде всего от уровня и скорости нагрева и следующего за ним охлаждения тела. В связи с этим расчеты температурных полей в соответствующих зонах материала имеют первостепенное значение [1–9].

Разработан алгоритм расчета и создана компьютерная программа для исследования тепловых процессов при лазерном упрочнении сталей движущимся источником нагрева со сканирующей системой, т.е. когда одновременно с движением ядра потока вдоль прямолинейной дорожки оно периодическим образом перемещается в поперечном направлении, двигаясь по траектории, которая представляет собой совокупность выходящих одна из другой последовательных поперечных линий, причем по условиям работы установки в точках этих линий интенсивность энергетического воздействия и скорость движения пятна может изменяться.

Методика исследований. Для лазерной обработки образцов применялся волоконный лазер непрерывного действия с максимальной мощностью 1 кВт. Технологический комплекс для лазерного упрочнения сталей оборудован сканирующей системой, которая обеспечивает многократное перемещение пятна нагрева по обрабатываемой поверхности с высокой частотой в направлении перпендикулярном направлению обработки [2]. Многократное перемещение лазерного пятна с высокой частотой обеспечивается применением системы двух дефлекторов (рис. 1), которые согласованно совершают колебания во взаимно перпендикулярных направлениях.

Разработанная программа учитывает, что при поверхностной обработке излучением волоконного лазера со сканирующей лазерный луч головкой производится отключение лазерного излучения после прохождения нескольких поперечных линий, т.е. обрабатываемая дорожка представляет собой последовательность зон, состоящих из участков непосредственного нагружения (пятно воздействия) и “ненагруженных” промежутков. Такой способ при малом радиусе кругового ядра лазера дает возможность создавать в материале тепловое поле определенной интенсивности при заданной номинальной мощности установки, что учтено при разработке программы.

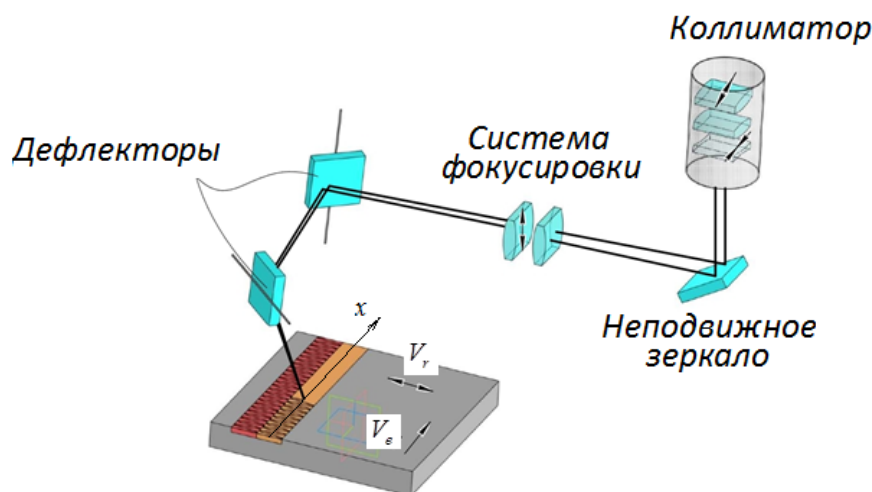


Рис. 1. Схема сканирующей системы

В качестве исходных кинематических данных для расчетов принимались скорость движения лазерной головки вдоль дорожки, длина и ширина дорожки, число поперечных линий на пятне сканирования и частота повторений прохождения двух взаимосвязанных линий. По этим данным определен период времени, соответствующий возврату оси луча в точку с фиксированной поперечной координатой. Задаваемое на лазерной установке число линий N_{lin} может быть нечетным или четным (во время испытаний число линий соответствовало значениям 7 и 10), поэтому на пятне сканирования уместается целое или полуцелое число периодов поперечного движения луча, равное $N_{lin}/2$. В связи с тем, что оплавление поверхности обрабатываемого материала происходит в круге определенного радиуса, а не только в точках попадания оси луча лазера, при небольших скоростях движения головки лазера происходит непрерывное слияние зон обработки «пятно+промежуток», поэтому уточнение ситуации может быть проведено только при достаточно больших скоростях движения лазерной головки, когда пятна и промежутки между ними явным образом выделяются. Это дает возможность определить продольную составляющую скорости сканирования, которая является одинаковой для любых скоростей движения лазерной головки при одном и том же числе линий на пятне и частоте их прохождения.

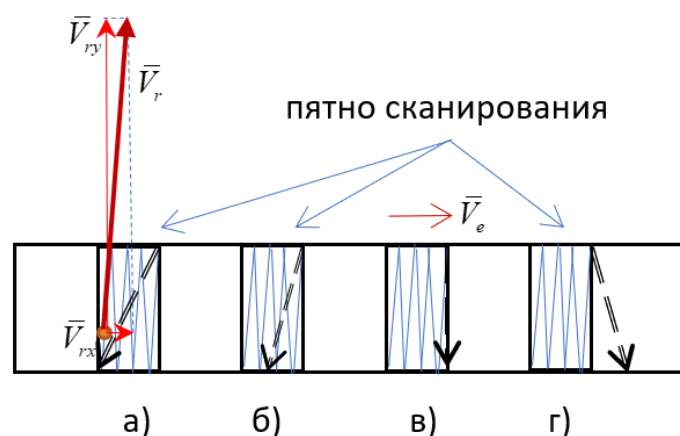


Рис. 2. Кинематика процесса лазерного сканирования

При составлении программы вычислений температурных полей предполагается, что наличие постоянной продольной и периодической поперечной скоростей сканирования позволяет считать ось луча при сканировании движущейся вдоль дорожки по некоторой зигзагообразной линии.

С точки зрения кинематики движение оси луча можно представить как сумму продольного переносного (вдоль оси x) и относительного продольного и поперечного движений, причем скорость переносного движения совпадает со скоростью лазерной головки (рис. 2).

Для определения продольной относительной скорости были проведены эксперименты по нагружению плоского стального образца размерами $200 \times 20 \times 7$ мм с разными скоростями движения головки. На рис. 3 показаны следы от воздействия лазерного луча на разных скоростях движения головки.



Рис. 3. Обработанный образец

а) $V_e = 20000$ мм/мин; б) $V_e = 10000$ мм/мин; в) $V_e = 1000$ мм/мин

Несмотря на то, что к концу дорожки след становится более оплавленным за счет общего повышения температуры образца с течением времени воздействия, при большом числе образовавшихся зон обработки ($V_e = 20000$ мм/мин) можно с достаточной точностью определить длину одной зоны L'_z , как отношение общей длины дорожки ($L_z \approx 198$ мм) к числу этих зон ($N=18$).

Известно, что центр пятна должен вернуться после прохода пятна в точку с координатой $y=0$, то при числе линий на пятне $N_{lin}=7$, соответствующему 3.5 периодам $T_{laz} = 1/f$, $f=220$ Гц, по формуле для длины зоны

$$L'_z = (V_e + V_r) \frac{N_{lin}}{2} T_{laz} + (V_e - V_r) k T_{laz}, \quad (1)$$

подбираем число k , которое должно быть полуцелым.

Принимаем из опыта при скорости $V_e = 20000$ мм/мин $= 100/3$ см/с длину зоны в пределах $L'_z = 1,04 \dots 1,1$ см. Находим, что в выбранном интервале такое число k существует. На рис. 4 приведена зависимость числа k от длины зоны «пятно+промежуток» L'_z .

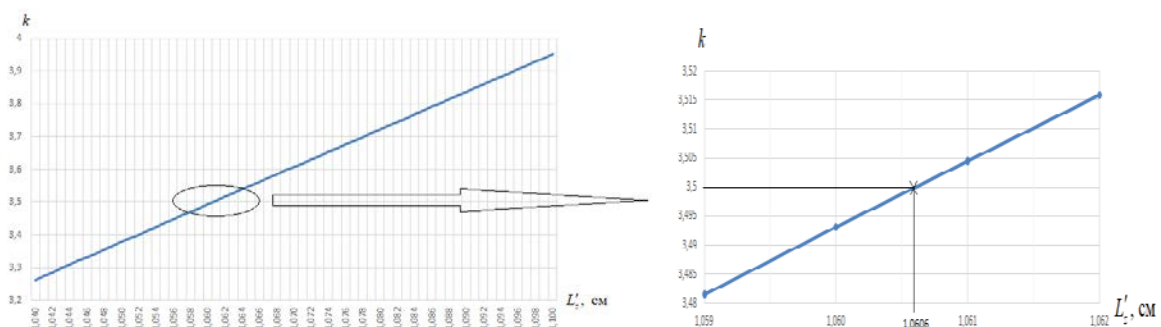


Рис. 4. Зависимость числа k от длины зоны «пятно+промежуток»

L'_z при $V_e = 20000$ мм/мин

По результатам расчета находим: $k=3.5=7/2 = N_{lin} / 2$. При расчетах принято:

$$V_{rx} = \frac{2LongX \cdot f}{N_{lin}}, V_{ry} = 2LongY \cdot f, \quad (2)$$

где $LongX = 2,25$ мм, $LongY = 4$ мм – продольный и поперечный размеры пятна сканирования.

По результатам расчета получено: $V_{ry} = 176$ см/с, $V_{rx} = 14.14$ см/с.

Абсолютная скорость при движении по пятну при $V_e = 20000$ мм/мин:

$$V_{ap} = V_e + V_{rx} = 47.48 \text{ см/с.}$$

Абсолютная скорость возвратного движения по промежутку между пятнами:

$$V_{av} = V_e - V_{rx} = 19.19 \text{ см/с.}$$

Таким образом, найденное значение V_r можно принять как достаточно обоснованное и использовать его для режимов с другими значениями скорости переносного движения.

Для различных скоростей переносного движения определено число N_z зон на образце длиной 198 мм в зависимости от длины пятна воздействия L_p и длины возвратного движения L_v , длина зоны «пятно+промежуток» L'_z . Некоторые результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчета количества зон при разных скоростях переносного движения

№ п/п	V_e , мм/мин	L_p , см	L_v , см	L'_z , см	N_z
1	300	0.23295	-0.21705	0.01591	1244.6
2	400	0.23561	-0.21439	0.02121	933.4
3	600	0.24091	-0.20909	0.03182	746.7
4	1000	0.25152	-0.19848	0.05300	373.4
5	2000	0.27803	-0.17197	0.10606	186.7
6	5000	0.35758	-0.0924	0.26515	74.7
7	8000	0.43712	-0.01288	0.42424	46.7
8	9000	0.46364	0.01364	0.47727	41.5
9	10000	0.49015	0.04015	0.53030	37.3
10	16000	0.64924	0.19924	0.84848	23.3
11	20000	0.75530	0.30530	1.06061	18.7

Знак «-» в L_v показывает, что следующее пятно накладывается на предыдущее (рис. 2, б). При $V_e = 8484$ мм/мин пятна не накладываются друг на друга и $L_v = 0$ (рис. 2, в). При $V_e > 8484$ мм/мин между пятнами сканирования образуется зазор. На рисунке 3 показаны эти случаи.

На рис. 5 показана зависимость размеров пятна и промежутка в зависимости от скорости переносного движения. Все зависимости имеют линейный характер.

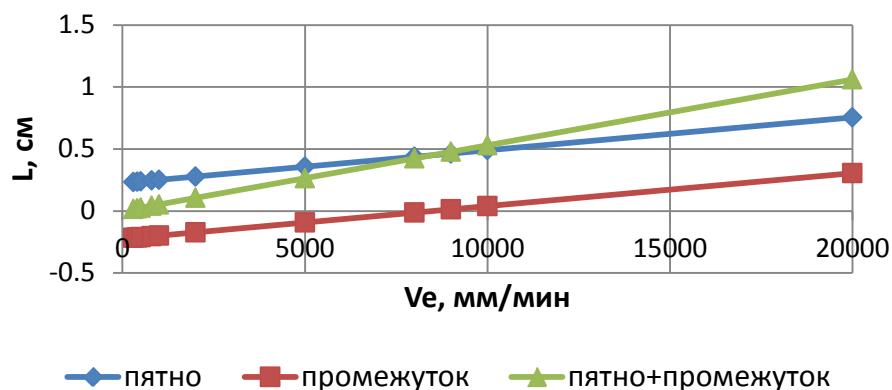


Рис. 5. Зависимости размеров пятна и промежутка от скорости переносного движения

Для источника нагрева, расположенного в точке $A(x, y, z)$, приращение температуры над исходным уровнем температуры тела в данной точке $A_0(x_0, y_0, z_0)$ в заданный момент времени t определяется выражением [3]:

$$T(r, t) = \frac{Q}{8(\pi a t)^{3/2}} \exp\left[-\frac{r^2}{4at}\right],$$

где Q – выделение тепла в точке в единицу времени, Дж; $a = \lambda/(c\rho)$ – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$ [6]; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$; c – удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; ρ – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; t – время, с; $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$ – расстояние от источника тепла до рассматриваемой точки, м (рис. 6). Исходная температура принята равной нулю.

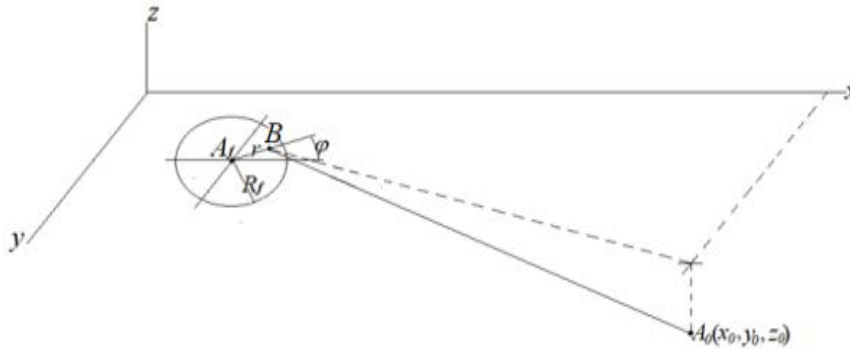


Рис. 6. Расстояние между точкой пятна и точкой A_0 тела

Поскольку источник излучения создает не точечный, а распределенный по некоторому закону поток, то величину Q можно представить в виде интеграла

$$\int q_0 \cdot f(a, t) da, \quad (4)$$

где q_0 – максимальная интенсивность потока, $f(a, t)$ – закон его распределения по площади a пятна нагрева в зависимости от текущего значения времени t . Функция $f(a, t)$ представима в виде произведения:

$$f(a, t) = f(a) \cdot f(t). \quad (5)$$

В качестве $f(a)$ можно выбрать различные приближенные представления, в частности используются равномерный по площади или распределенный по гауссовому закону поток.

Поскольку тепловое воздействие распределено по некоторой поверхности тела, необходимо рассматривать действие совокупности точечных источников, что приводит к необходимости интегрирования выражения (1) в пределах этой поверхности:

$$T_s(r, t) = \int \left\{ \int T(r, t) ds \right\} d\xi, \quad (6)$$

где ξ – переменная интегрирования по времени от начального значения $\xi_0=0$, S – переменная интегрирования по поверхности.

Распределение интенсивности воздействия по площади ядра подчинено гауссовому закону $q = q_0 \exp(-\gamma r^2)$, где r – расстояние от оси луча, γ – коэффициент сосредоточенности потока. Поскольку при этом r меняется от нуля до бесконечности, при решении задач зона ядра потока ограничивается некоторым радиусом R_f , так что выражение для q можно записать в виде $q = q_0 \exp\left(-\left(r/R_f\right)^2\right)$ [4].

Поскольку при движении луча по дорожке предполагается изменение потока во времени, то множитель q_0 следует записать в виде $q_0 \cdot F(t)$, где функция времени $F(t)$ должна описывать фактический закон изменения интенсивности потока и, таким образом, должна быть введена в подынтегральное выражение (4) при значениях $0 \leq F(t) \leq 1$. Эту функцию далее представляем в виде произведения $F(t) = \text{Coef}(t) \cdot G_f(t)$ так, чтобы функция $\text{Coef}(t)$

учитывала изменение общей мощности источника (например, ее отключение до значения $F(t)=0$ на участках промежутка между пятнами), а $G_f(t)$ – изменение мощности при нахождении оси луча вблизи продольных краев дорожки. Необходимость введения функции $G_f(t)$ связана с тем, что возле краев дорожки относительная скорость поперечного движения луча принимает значения близкие к нулю и равные ему, что в реальных условиях работы установки вызывает возможность значительного перегрева материала. Характер изменения функции $F(t)$, а также координат x и y показан на рис. 7.

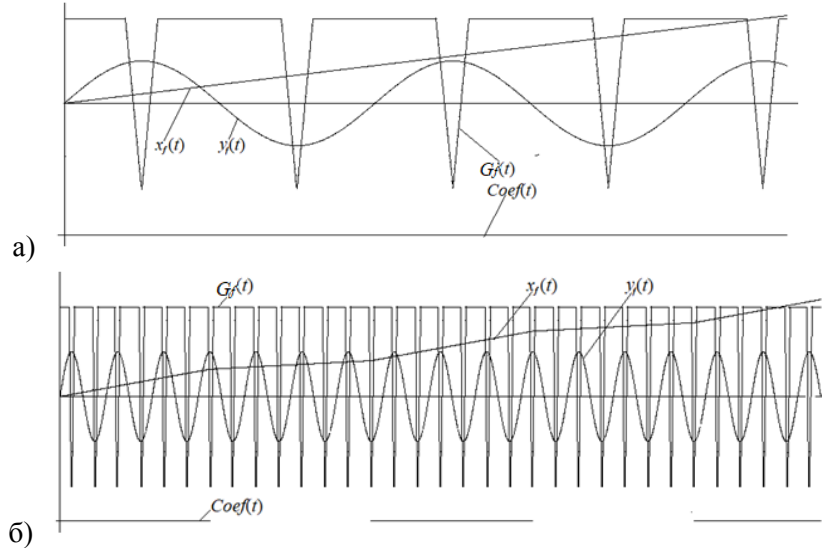


Рис. 7. Вид функций $G_f(t)$, $Coef(t)$, $x_f(t)$, $y_f(t)$ на разных отрезках времени (точки конца графиков соответствуют времени $t \approx 2,5T_{laz}$ (а) и $t \approx 16,5T_{laz}$ (б))

Если рассматривать вопрос об определении температуры для точек, находящихся на достаточном удалении от оси луча источника, то внутренний интеграл в (6) можно определить, относя при этом все энергетическое воздействие к оси луча, и для определения расстояния между источником и рассматриваемой точкой использовать приведенное выше в (3) определение этого расстояния. Однако учитывая наличие достаточно большой зоны оплавления вдоль линий пятна воздействия на поверхности образца, более правильным будет воспользоваться расчетной схемой, приведенной на рис. 6, которая учитывает, что каждая точка ядра потока имеет не только свой уровень интенсивности воздействия, но и свое расстояние до рассматриваемой точки A_0 с координатами x_0, y_0, z_0 .

При этом подынтегральное выражение в (6) включает в себя экспоненциальную переменную составляющую Ψ с аргументом, зависящим от времени, координат выделенной точки A_0 и окружающих ее точек, которые могут быть взяты дополнительно в прилегающем к ней объеме материала, текущих координат точки A_f оси луча и положения точки B внутри ядра потока (переменные r и φ на рис. 6):

$$\psi = \exp \left[- \left(\frac{r^2 \left(1 + \frac{4a \cdot s}{R_f^2} \right) + ((x_k - x_f)^2 + (y_k - y_f)^2 + z_k^2 - 2r(x_{0f} \cos \varphi + y_{0f} \sin \varphi))}{4a \cdot s} \right) \right], \quad (7)$$

где $s = t_k - t_f$; $x_{0f} = x_0 - x_f$; $y_{0f} = y_0 - y_f$; x_k, y_k, z_k – координаты точки, выделенной внутри объема вокруг точки A_0 , м.

В формуле (7) подстрочным индексом «f» отмечено значение координат оси луча на поверхности образца в текущий момент времени t_f . Само интегрирование по времени t_f должно производиться от начального момента $t_0=0$ до заданного конечного t_k значения $t_k \geq t_f$

и, таким образом, будет учитывать смещение оси потока вдоль дорожки и соответствующий общий разогрев тела. Окончательно вместо (6) с учетом сделанных выше определений получаем расчетную формулу в виде:

$$T = \frac{q_0}{8\rho c (\pi a)^{3/2}} \int_0^s \int_0^{R_f} \int_0^{2\pi} \frac{F \cdot \Psi}{s^{3/2}} r dr d\varphi ds, \quad (8)$$

где F и Ψ – отражают временные и пространственные характеристики воздействия теплового потока. Наличие внутри подынтегрального выражения тригонометрических функций вызывает необходимость в одновременном численном интегрировании по r и φ и в связи с этим заметно увеличивает длительность проведения вычислений. Как сам интеграл (6), так и его внутренние интегралы в программе вычисляются по методу Симпсона.

На рис. 8 представлены кривые нарастания температуры в точках A_0 , лежащих у конца графиков, приведенных на рис. 7, для двух значений скоростей движения лазерной головки $V=33,3$ и 1 см/с. Расчет проводился при мощности лазера $P_0 = 1$ кВт, температуре плавления $T^{nl} = 1550$ °С, характеристиках материала $\rho = 7860 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $\lambda = 38 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{С}}$, $c = 745 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$, радиусе пятна сканирования $R_f = 0,05$ см.

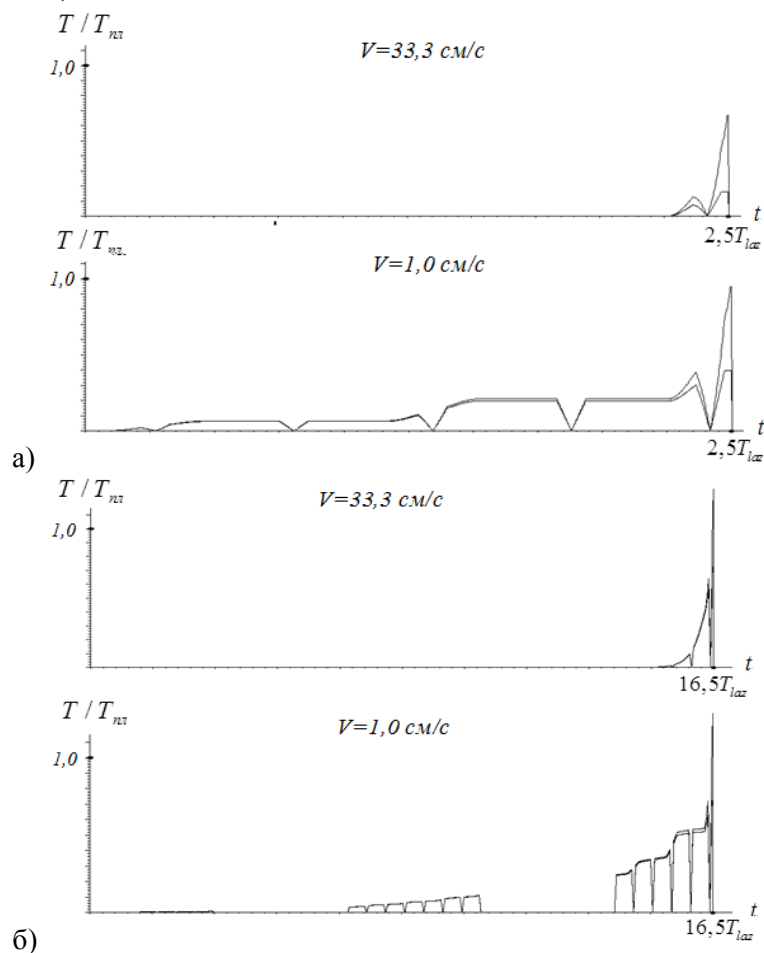


Рис. 8. Развитие температуры на поверхности $h=0$ мм и глубине $h=0,1$ мм при различных скоростях движения лазера
а) рис. 7, а; б) рис. 7, б

Установлено появление максимума температуры в заданной точке после момента времени, по которому назначался выбор координаты x_0 . Такая ситуация прямо вытекает из теории теплопроводности и формулы Грина, положенной в основу построения расчетных программ.

Заключение.

Разработана программа для исследования тепловых процессов в зоне действия лазерного луча. В программе предусмотрена возможность проведения вычислений уровня температуры одновременно для нескольких точек, располагающихся в прилегающем к точке A_0 объеме материала. Кроме того, программа позволяет определять тепловые импульсы, импульсы структуризации и время структуризации в выбранных точках и сечении дорожки [5], что расширяет возможность прогнозирования результатов термообработки и позволяет оценить, какая часть тепловой энергии расходуется на структурообразование материала в зоне термического влияния. Результаты расчета на каждом шаге времени выводятся в файл *Rezultat.dat*. В начальной части файла для контроля ввода исходных данных выводятся наименования и пояснения к ним для основных параметров материала, режима нагружения и организации вывода, а также их числовые значения. Изменение координат x_f , y_f точки A_f по времени выводится дополнительно также в отдельный файл *CoordXY.dat*. Для каждой линии внутри одного пятна сканирования процесс прогрева материала является однообразным, квазистационарным, и появление нарастающего отличия может быть связано только с общим прогревом материала образца на последующих зонах лазерной дорожки. Это подтверждается как результатами расчетов (рис. 8), так и непосредственным видом обработанных зон на использованных в опытах образцах (рис. 3).

Литература:

1. Веремейчик, А. И. Некоторые аспекты определения температурных полей при термоупрочнении металлоизделий / А. И. Веремейчик, В. М. Хвисевич, Б. Г. Холодарь // Перспективные материалы и технологии / Антанович А. А. [и др.] ; под ред. В. В. Рубаника. – Минск : ИВЦ Минфина, 2023. – Гл. 18. – С. 218–237.
2. Девойно, О. Г. Моделирование поверхностной закалки с использованием сканирующего оптоволоконного лазера / О. Г. Девойно, В. В. Жарский, А. П. Пилипчук // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 435–443. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-435-443>.
3. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов / Н. Н. Рыкалин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
4. Веремейчик, А. И. Температурное поле в полупространстве при нагреве движущимся источником с равномерно-распределенным по прямоугольной площадке потоком / А. И. Веремейчик, Б. Г. Холодарь // Фундаментальные и прикладные задачи механики : материалы Междунар. науч. конф., Москва, 6–9 дек. 2022 г. : в 2 ч. / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана» ; [сост.: П. М. Шкапов, А. И. Игнатов]. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023. – Ч. 1. – С. 66–71.
5. Веремейчик, А. И. Моделирование тепловых процессов в полупространстве при нагреве движущимся источником с равномерно-распределенным тепловым потоком / А. И. Веремейчик, Б. Г. Холодарь // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 318–330.
6. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1964. – 488 с.
7. Ravi, T. Optimization of Heat Transfer through Rectangular Duct / T. Ravi, F. Z. Pathan, M. Vahadne // Intern. Res. J. Eng. Technol. (IRJET). – 2015. – Vol. 2, iss. 4. – P. 1906–1910.
8. Ahire, Y. M. Three-Dimensional Unsteady State Temperature Distribution of Thin Rectangular Plate with Moving Point Heat Source / Y. M. Ahire, K. P. Ghadle // Indian J. Mater. Sci. – Vol. 2016. – Art. ID 7563215. <https://doi.org/10.1155/2016/7563215>
9. Немчинский, А. Л. Тепловые расчеты термической обработки / А. Л. Немчинский. – Л.: Судпром, 1953. – 106 с.

Investigation of the temperature field during laser hardening of steels

Verameichyk A.I.^{1,a}, Holodar B.G.^{1,b}

¹Brest State Technical University, Moskovskaya st., 267, 224017, Brest, Belarus

^avai_mrtm@bstu.by, ^bhbg@list.ru

Keywords: hardening, temperature field, laser, scanning system, spot, beam.

The kinematics of the heating spot movement during laser hardening of steels with a scanning beam has been studied, and the sizes of the spot-gap zones for various speeds of movement of the laser head have been theoretically determined. To solve the problem of thermal conductivity, the method of an instantaneously applied point source (Green's functions) is used with appropriate integration of the effect over the area of the heating spot. An algorithm and a computer program for calculating the temperature field during laser hardening of steels have been developed.

УДК 621.01:621.818

Сравнение методов аппроксимации функционала проницаемости для упругого контакта шероховатых поверхностей

Кушнарев В.С.^a

¹Братский Государственный Университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^akushvs@yandex.ru

Ключевые слова: функционал проницаемости, упругий контакт, аппроксимация, герметичность, шероховатые поверхности, относительная площадь контакта.

Представлены результаты вычислительного эксперимента по оценке эффективности для двух методов аппроксимации функционала проницаемости, определяющего герметичность уплотнительных соединений при упругом контакте шероховатых поверхностей. Проведено сравнение традиционного подхода, основанного на усреднении параметров, и метода аппроксимации двумя прямыми, который разделяет функционал на зоны с различной динамикой изменения герметизирующих характеристик. Сделаны выводы о том, что метод через аппроксимацию двумя прямыми лучше описывает поведение функционала проницаемости в области перехода от начальной к стабильной зоне контакта, а аппроксимация средним значением дает лучшие результаты при малых нагрузках. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации расчетов герметичности в инженерных приложениях и программах.

Введение. Герметичность соединений в технических системах во многом зависит от контактных характеристик сопрягаемых поверхностей, таких как относительная площадь контакта и плотность зазоров. Для их описания используется функционал проницаемости, который связывает микроструктуру поверхности с утечками рабочей среды. В работах [1-3] предложены методы аппроксимации данного функционала через среднее значение. Как альтернативный вариант предлагается рассмотреть аппроксимацию двумя прямыми. Аппроксимация средним значением – подход, основанный на усреднении параметров контакта. Аппроксимация двумя прямыми – метод, разделяющий функционал на участки с различной динамикой изменения герметичности.

Экспериментальные данные часто содержат шумы и неоднородности, связанные с переходом между режимами упругой и пластической деформации. Точная аппроксимация этих данных необходима для:

- 1) Прогнозирования герметичности при проектировании.
- 2) Оптимизации параметров соединений.

В настоящее время преобладает подход, основанный на усреднении параметров контакта. Однако, как отмечают Ястребов [4], такой метод не учитывает существенную нелинейность изменения герметизирующих характеристик при увеличении контактного давления. Альтернативный метод аппроксимации через две прямых, предложенный в

работах [5,6], позволяет повысить точность расчетов за счет разделения процесса контактирования на характерные зоны.

Методология исследования. Основная процесс организации исследования изложен в результатах [7].

В общем виде функционал проницаемости определяется как [8]:

$$C_u = (S \cdot P) / \alpha, \quad (1)$$

где: S – относительная площадь контакта; P – плотность зазоров; α – коэффициент геометрии микроканалов.

Тогда как для оценки герметизирующей способности стыка функционал проницаемости C_u , зависящий от параметров микрогеометрии и контактного давления примет вид:

$$C_u = \frac{\Lambda^3 K_f \nu_k}{4(1-\eta)^2}, \quad (2)$$

где K_f – коэффициент, учитывающий потери, обусловленные конструктивными элементами и местными преградами (для обеспечения запаса при определении герметичности его можно приравнять к единице);

ν_k – доля эффективных микроканалов.

Подход при использовании средних значений параметров предполагает [9]:

$$C_{cp} = k \cdot fq + c, \quad (3)$$

где fq – безразмерный параметр нагрузки.

Метод через две прямые учитывает зональность контактного процесса и предполагает разделение функционала на две зоны:

1) Начальная зона ($fq \leq 0.05$) – герметичность определяется внедрением наиболее высоких неровностей.

2) Зона стабильного контакта ($fq > 0.05$) – герметичность обусловлена уменьшением плотности зазоров и слиянием пятен контакта.

Аналитически можно представить как

$$C_{np} = \begin{cases} k_1 * fq + c_1, & fq \leq 0.05 \\ k_2 * fq + c_2, & fq > 0.05 \end{cases} \quad (4)$$

где k_1, k_2, c_1, c_2 – коэффициенты, определяемые экспериментально.

Для каждого уплотнительного соединения необходимо определить требуемый функционал проницаемости и зависимость $C_u(q)$ из которого получить силовые параметры и ширину зоны контакта.

Реализовав указанные математические модели было выявлено что метод аппроксимации через две прямые не обладает достаточной точностью на граничных значениях, а метод аппроксимации через среднее хуже описывает поведение функционала проницаемости в области перехода от начальной к стабильной зоне контакта. Сравнение данных методов представлены на рисунке 1 и в таблице 1.

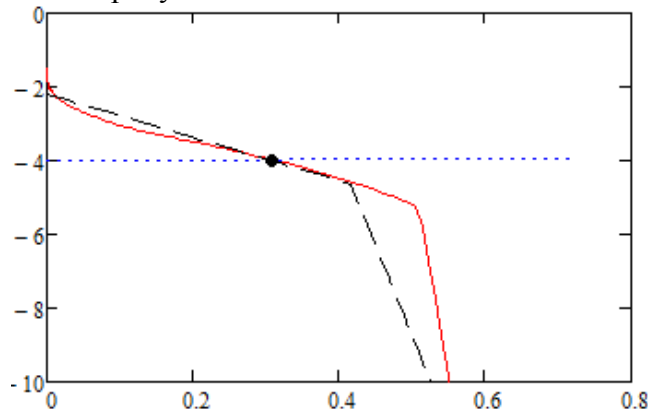


Рис. 1. Сравнение методов аппроксимации для определения ширины зоны контакта: красная линия – через среднее; черная пунктирная – через две прямых.

Таблица 1

Сравнение методов аппроксимации

Критерий	Константная модель (среднее)	Кусочно-линейная модель (через две прямых)
Точность	Высокая для плоских данных	Лучше при наличии излома
Интерпретируемость	Низкая	Высокая (физический смысл)
Устойчивость к шуму	Высокая	Средняя
Вычислительная сложность	$O(N)$	$O(N^2)$ (перебор)

Проведение вычислительного эксперимента. Подставляя результат определения ширины зоны контакта в алгоритм описанный в [7] на основе остальных функций по определению напряженно-деформированного состояния, мы определяем остальные параметры вычислительного эксперимента. Результаты итогового расчета представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Результат вычислительного эксперимента через среднее

№ Эксп	b, мм	r, мм	α	$\sigma_{\text{экв}}$, МПа	N_y , цикл	$q_{\text{пmax}}$	N_c , цикл	q_l , Н/мм
8	0.634	7.125	80.625	495.488	758514	611.147	3873	392.236
4	1.257	2.75	33.75	743.073	11380	943.964	689.901	458.352
6	1.881	1.875	61.875	767.618	8127	1159	283.77	849.157
5	4.376	5.375	24.375	617.986	76860	950.916	425.683	992.582
2	2.505	4.5	52.5	642.456	51421	920.49	606.851	1009
7	3.129	3.625	43.125	711.815	17770	1026	371.03	1078
3	3.752	6.25	71.25	594.711	114431	884.859	597.411	1514
1	5	1	90	1044	337.164	1687	44.82	1813

Таблица 3

Результат вычислительного эксперимента через две прямых

№ Эксп.	b, мм	r, мм	α	$\sigma_{\text{экв}}$, МПа	N_y , цикл	$q_{\text{пmax}}$	N_c , цикл	q_l , Н/мм
4	1.257	2.75	33.75	481.349	$1.024 \cdot 10^6$	434.011	$1.711 \cdot 10^3$	142.279
8	0.634	7.125	80.625	384.317	$1.055 \cdot 10^7$	394.608	$6.98 \cdot 10^3$	201.683
6	1.881	1.875	61.875	408.077	$5.668 \cdot 10^6$	449.847	818.045	204.655
1	5	1	90	424.568	$3.76 \cdot 10^6$	475.497	170.895	270.873
5	4.376	5.375	24.375	335.701	$4.287 \cdot 10^7$	404.998	$1.109 \cdot 10^3$	275.166
7	3.129	3.625	43.125	346.901	$3.051 \cdot 10^7$	421.876	$1.006 \cdot 10^3$	283.269
2	2.505	4.5	52.5	358.498	$2.17 \cdot 10^7$	412.981	$1.524 \cdot 10^3$	302.022
3	3.752	6.25	71.25	292.528	$1.785 \cdot 10^8$	398.826	$1.482 \cdot 10^3$	456.721

Результаты и обсуждения. Для оценки эффективности методов использованы данные моделирования упругого контакта шероховатых поверхностей [3, 5]. Результаты показали, что:

1) Аппроксимация средним значением дает лучшие результаты при малых нагрузках.

2) Метод аппроксимации через две прямые точнее описывает поведение функционала проницаемости в области перехода от начальной к стабильной зоне контакта.

Выводы. Проведенный эксперимент позволяет сформировать дальнейшие направления исследования:

- 1) Рассмотреть использование регуляризации для улучшения устойчивости кусочно-линейной модели.
- 2) Применение машинного обучения для автоматизации выбора типа аппроксимации.

Литература:

1. Огар П. М., Горохов Д. Б. Контактные задачи в герметологии неподвижных соединений. Москва; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. - 248 с.
2. Xu Y., Jackson R. L. Statistical models of nearly complete elastic rough surface contact-comparison with numerical solutions // Tribology International. - 2017. - Vol. 105. - P. 274-291. - DOI: 10.1016/j.triboint.2016.10.005.
3. Yastrebov V. A., Anciaux G., Molinari J.-F. From infinitesimal to full contact between rough surfaces: Evolution of the contact area // International Journal of Solids and Structures. - 2015. - Vol. 52. - P. 83-102. - DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2014.09.019.
4. Yastrebov V. A. Numerical Methods in Contact Mechanics. - London : ISTE Wiley, 2018. - 320 p.
5. Ogar P., Belokobylsky S., Gorokhov D. Contact mechanics of rough surfaces in hermetic sealing study // Contact and Fracture Mechanics / ed. P. H. Darji. - 2018. - P. 89-115.
6. Kosinski V. V. Determination of the permeability coefficient of porous bodies during impregnation with viscous liquids under pressure // Metallurgy. Proceedings of Zaporizhzhya State Engineering Academy. - 2006. - Iss. 13. - P. 55-59.
7. Кушнарев, В. С. Автоматизация расчета параметров уплотнительных соединений // Механики XXI века. - 2024. - № 23. - С. 269-277.
8. Dashman S. Vacuum Technology. M.: Mir, 1964.
9. Johnson K. L. Contact Mechanics. - Cambridge : Cambridge University Press, 1985. - 452 p.

Comparison of methods for approximating the permeability functional for elastic contact of rough surfaces

Kushnarev V.S.^a

Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, Russian Federation

^akushvs@yandex.ru

Keywords: permeability functional, elastic contact, approximation, tightness, rough surfaces, relative contact area.

The article presents the results of a computational experiment to evaluate the efficiency of two methods of approximating the permeability functional that determines the tightness of sealing joints under elastic contact of rough surfaces. A comparison is made between the traditional approach based on averaging the parameters and the approximation method by two straight lines, which divides the functional into zones with different dynamics of change in the sealing characteristics. It is concluded that the method through approximation by two straight lines better describes the behavior of the permeability functional in the transition region from the initial to the stable contact zone, and approximation by the average value gives better results under low loads. The results of the study can be used to optimize tightness calculations in engineering applications and programs.

УДК 536.2

О тепловых импульсах при действии движущегося локального источника нагрева

Веремейчик А.И.^{1,a}, Холодарь Б.Г.^{1,b}¹Брестский государственный технический университет, ул. Московская, 267, Брест, 224017, Беларусь^avai_mrtm@bstu.by, ^bhbg@list.ru

Ключевые слова: тепловой импульс, структуризация, температурное поле, пятно нагрева, скорость.

Недостатки существующих методов линейной теплопроводности, отсутствие прямого учета в расчетной схеме зоны поверхностного расплава материала не позволяют достоверно оценивать влияние режимов термообработки на изменение свойств материала, ориентируясь только на уровень максимальной расчетной температуры. В связи с этим структурообразование металла в зоне теплового воздействия предложено связывать с тепловым импульсом, т.е. полной тепловой энергией, воспринятой материалом в данной точке тела, а также с введенным в рассмотрение эффективным импульсом структуризации, характеризующим энергию, затрачиваемую на процесс структурных превращений материала, и временем структуризации в точке и некотором объеме тела. Представлены зависимости этих величин от скорости движения и формы пятна нагрева.

Введение. В настоящее время в научно-технической литературе приводятся решения задач теплопроводности, посвященных определению пространственно-временных распределений температуры, создаваемых движущимися источниками тепла. При нагреве тела локальными поверхностными источниками в нем возникают большие градиенты температур, поэтому теплофизические характеристики не являются константами материала. Однако в большинстве случаев в связи со сложностью учета зависимостей этих характеристик от температуры при проведении расчетов температурных полей они принимаются осредненными (согласно [1], для стали их следует принимать соответствующими температуре $T \approx 900$ °С). Кроме того, толщина обрабатываемой детали зачастую может рассматриваться как бесконечная. При указанных обстоятельствах для решения поставленной в настоящей работе задачи об определении температурного поля тела, вызываемого движущимся источником, удобным является использование функций Грина (метод мгновенно-приложенного точечного источника) с соответствующим интегрированием воздействия по площади пятна нагрева [1–5].

В соответствии с принципом локальности нагружения Сен-Венана, широко используемым в механике деформируемых твердых тел, в том числе в теории теплопроводности [6], распределение интенсивности потока теплового воздействия по пятну нагрева сказывается незначительным образом на температурное поле в удаленных от пятна точках. Однако в случае исследования структурных превращений в поверхностных слоях материала, возникающих при действии подвижных высокоэнергетических тепловых потоков, конкретное распределение потока по поверхности тела может приобрести определяющую роль.

В многочисленных работах, посвященных определению температурных полей в подобных случаях рассмотрены разнообразные формы пятен нагрева, распределений интенсивности потока в их пределах, использованы различные методы решения соответствующих уравнений.

Установлено, что темп изменения возникающего температурного поля при воздействии подвижных источников определяет величину температурных градиентов и напряжений в

материале и влияет на структурные превращения в соответствующем объеме тела как при нагреве, так и при охлаждении. Исследования показывают, что сложный процесс структуризации в точках тела напрямую зависит от различных характеристик реализующегося температурного поля (уровень максимальной температуры, длительность температурного воздействия, скорости нагрева и охлаждения). Поэтому знание законов изменения температуры в зоне нагрева и разработка новых критериев оценки возможной результативности обработки представляет собой важный элемент управления процессом оптимизации свойств материалов.

Постановка задачи. Одной из важных характеристик воздействия концентрированных источников нагрева на материалы является температурное поле. Методом приложения мгновенных точечных источников в [1] получено решение задачи теплопроводности при поверхностном нагреве тела в форме полупространства движущимся с постоянной скоростью по прямолинейной траектории равномерно-распределенным высококонцентрированным тепловым потоком с различной формой пятна нагрева при постоянных теплофизических характеристиках материала. Ввиду отсутствия прямого учета в расчетной схеме зоны поверхностного расплава материала исследование влияния температурного поля на структурообразование материала в зоне теплового воздействия, основанное только на уровнях максимальных температур, является недостаточно информативным и не учитывает время теплового воздействия [2]. При таком подходе не учитывается, что при температуре выше температуры плавления структура стали не является аустенитной и сам материал находится в жидкой фазе. Поэтому предполагается целесообразным включение в рассмотрение только ситуаций, когда вычисленная температура находится в пределах существования аустенитного состояния.

Для этого дополнительно в расчет вводится температура структуризации T_{str} , представляющая собой нижний уровень температуры перехода аустенита в мартенситную структуру для заданного материала, устанавливаемая экспериментально для рассматриваемого процесса [3]. Для каждого режима нагрева с $V \neq 0$ при появлении в рассматриваемой точке с координатами $[x, y, z]$ температуры $T > T_{str}$ вычисляется величина отрезка времени δt_{str} , на котором эта ситуация имеет место, значение интеграла $I_T = \int T dt$ на нем и интеграла $I_{str} = \int (T > T_{str}) dt$, а также их относительной величины $\theta = \frac{I_{str}}{I_T}$. Интеграл I_T

представляет собой расчетную величину теплового импульса, воспринятого материалом в данной точке тела при выполнении условия $T > T_{str}$, интеграл I_{str} – часть этого импульса, вычисление которой подчиняется условиям: если $T_{str} < T(t) < T_{plav}$, то подынтегральная функция имеет вид $T(t) - T_{str}$; если $T(t) > T_{plav}$, то подынтегральная функция представляет собой функцию, ограниченную двумя константами $T_{plav} - T_{str}$ (рис. 1).

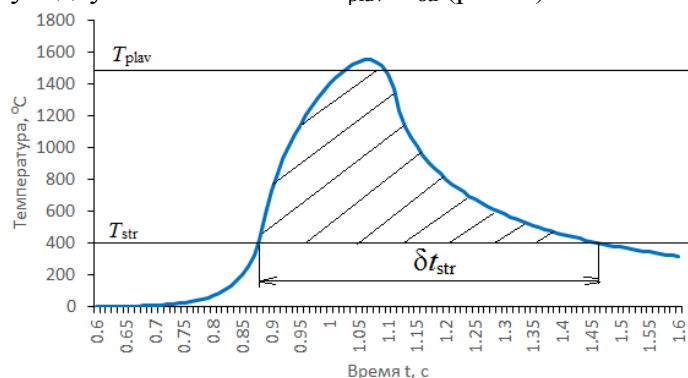


Рис. 1. К определению теплового импульса

Так как температура является показателем энергии движения частиц, импульс структуризации I_{str} характеризует энергию, затрачиваемую на структурные превращения материала в точке.

Некоторые результаты и их обсуждение. Так как изменение структуры материала в зоне термического воздействия происходит на небольших глубинах, то в качестве объекта теплового нагружения можно рассматривать полупространство, что сводит к минимуму число граничных условий задачи теплопроводности и позволяет использовать для решения метод приложения мгновенных точечных источников тепла. Для такого источника энергии, расположенного в точке с координатами $[x_0, y_0, z_0]$, температурное поле в любой точке тела в заданный момент времени описывается выражением [1]:

$$T(r, t) = \frac{Q}{8\lambda\sqrt{a}(\pi t)^{3/2}} \exp\left[-\frac{r^2}{4at}\right], \quad (1)$$

где Q – выделение тепла в точке в единицу времени, Дж; $a = \lambda/(c\rho)$ – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$; c – удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; ρ – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; t – время, с; $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$ – расстояние от источника тепла до рассматриваемой точки с координатами $[x, y, z]$, м. В формуле (1) T представляет собой приращение температуры над ее исходным уровнем в теле (для удобства далее принимаем его одинаковым во всех точках).

Поскольку тепловое воздействие распределено по некоторой поверхности тела, необходимо рассматривать действие совокупности точечных источников, что приводит к необходимости интегрирования выражения (1) в пределах этой поверхности S :

$$T(r, t) = \int \left(\int T_s(r, t) ds \right) d\xi, \quad (2)$$

где ξ – переменная интегрирования по времени от начального значения $\xi = 0$.

В случае движения с постоянной скоростью V вдоль оси x источника с нормально-круговым распределением интенсивности исходящего потока выражение (2) примет вид [2]:

$$T(x, y, z, t) = \left[2P_0 \exp\left(-\frac{Vx}{a}\right) (c\gamma(4\pi a)^{3/2}) \right] \int_0^t \frac{1}{\sqrt{\xi}(t_0 + \xi)} \exp\left[-\frac{z^2}{4a\xi} - \frac{r^2}{4a(t_0 + \xi)} - \frac{V^2(t_0 + \xi)}{4a}\right] d\xi, \quad (3)$$

для источника с потоком, равномерно-распределенным по прямоугольной площадке, получаем:

$$T(x, y, z, t) = \frac{q}{8\rho c\sqrt{\pi a}} \int_0^w \exp\left(-\frac{z}{w}\right)^2 F_x F_y dw, \quad (4)$$

$$F_x = \Phi\left[\left(\frac{x+b}{w} - \frac{V}{4a}w\right)\right] - \Phi\left[\left(\frac{x-b}{w} - \frac{V}{4a}w\right)\right], \quad (5)$$

$$F_y = \Phi\left[\frac{y+l}{w}\right] - \Phi\left[\frac{y-l}{w}\right],$$

где q – интенсивность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $w = \sqrt{4at}$, м; b, l – полуразмеры площадки вдоль осей x и y соответственно, м; $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du$ – интеграл вероятности.

С использованием метода Симпсона [7] выражения (3)–(5) далее подвергаются численному интегрированию на соответствующем отрезке времени.

Числовые значения теплофизических параметров материала принимались равными: плотность $\rho = 7860 \text{ кг}/\text{м}^3$, удельная теплоемкость $c = 745 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 38 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, температура плавления $T_{\text{пл}} = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ [3]. Расчеты температурного поля, скоростей нагрева и охлаждения в зависимости от времени и координат проводились для различных скоростей движения и форм пятна нагрева. Последние задавались в виде прямоугольника или квадрата с одинаковой площадью $A = 9 \text{ мм}^2$. Прямоугольная площадка имела стороны 4,25 и 2,0 мм, которые могут быть

ориентированы широкой стороной либо перпендикулярно оси движения источника, либо параллельно ей. Сравнение проводилось также с расчетами для пятна круглой формы радиусом $R \approx 1,69$ мм с гауссовым распределением интенсивности потока. Скорость движения источника варьировалась в пределах $V = 0,5\text{--}5,0$ см/с, эффективная мощность принималась равной $P_0 = 1$ кВт, начальное положение источника соответствовало координате $x = 0$ см.

На рис. 2 приведены зависимости полного теплового импульса, импульса структуризации и времени структуризации от скорости движения источника при $T_{\text{str}} = 400$ °C в точке на поверхности при $x_0 = 4$ см.

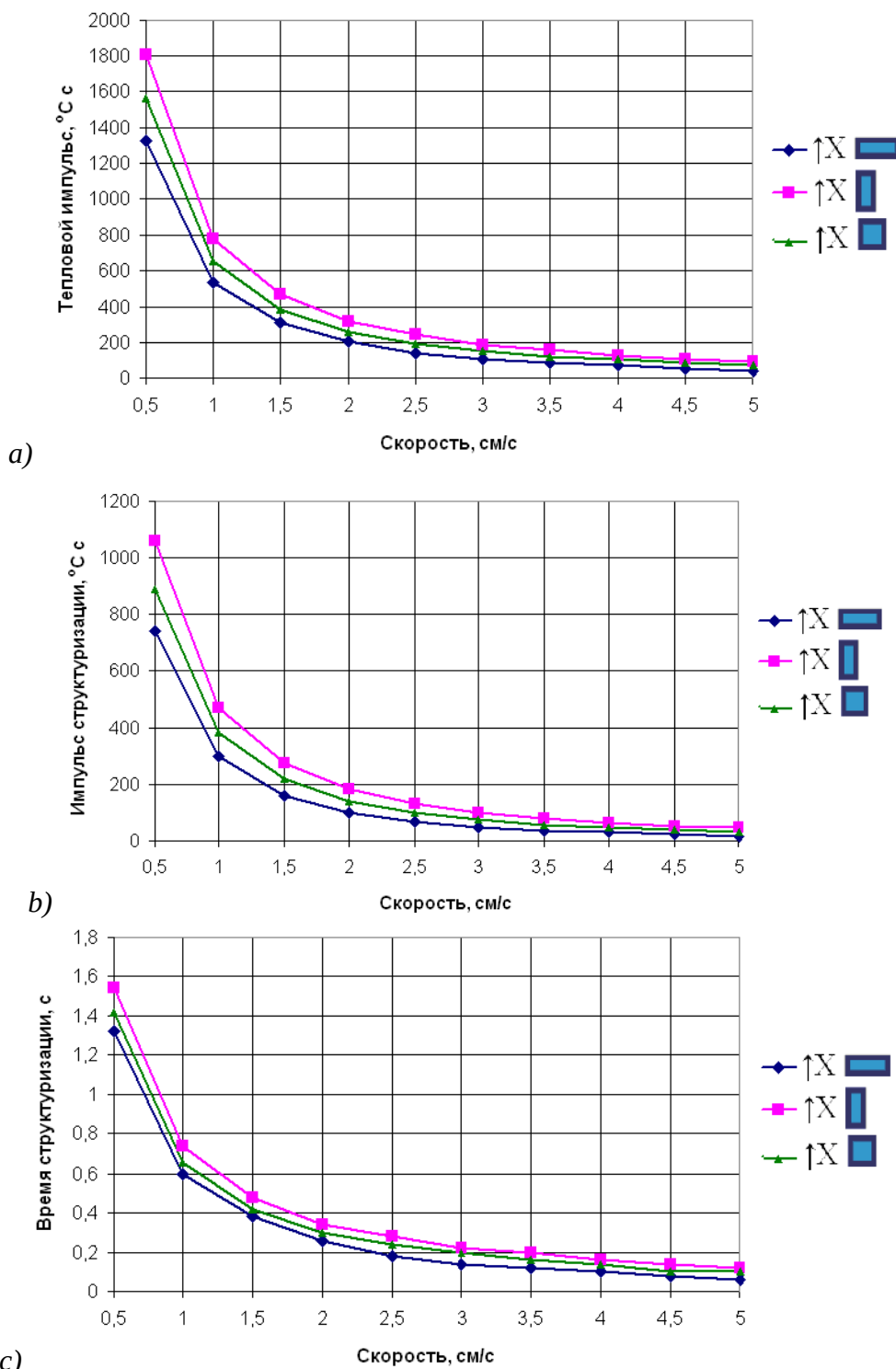


Рис. 2. Зависимости теплового импульса (a), импульса структуризации (b) и времени структуризации (c) на поверхности при $x_0 = 4$ см, $P_0 = 1$ кВт от скорости движения пятна нагрева

Анализ рис. 2 показывает, что при увеличении скорости движения пятна нагрева тепловой импульс уменьшается по зависимостям, схожим с изменением максимальной температуры, однако темп снижения теплового импульса с ростом скорости в нашем случае значительно выше, чем температуры.

Установлено, что изменение величины относительного коэффициента θ , показывающего, какая часть всей тепловой энергии расходуется на структурообразование материала в зоне теплового влияния, при росте скорости движения пятна имеет нелинейный характер (рис. 3).

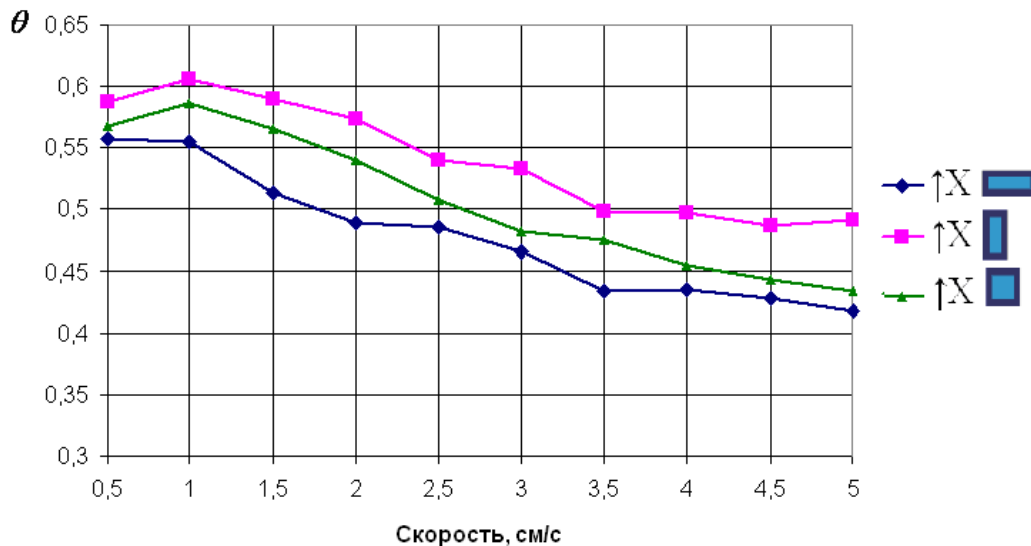


Рис. 3. Зависимость θ на поверхности от скорости движения пятна нагрева при $P_0 = 1$ кВт

Величины I_T и I_{str} могут быть вычислены как в заданной точке, так и как интегралы по площади сечения (в плоскости YOZ) и объему прилежащего слоя материала.

В связи с нелинейностью введенных функций I по координатам y и z криволинейная поверхность, образуемая ими над прямоугольным участком сечения, приближенно может быть представлена в виде двух треугольных плоскостей, линия пересечения которых проходит через соответствующие диагональные точки. При этом объем цилиндрического тела, заключенного между ними и основанием $dy \cdot dz$ составляет:

$$F = \frac{2(f_1 + f_3) + (f_2 + f_4)}{6} dy \cdot dz, \quad (6)$$

где $(f_1 + f_3)$ — сумма наименьшего и наибольшего значений функций I , $(f_2 + f_4)$ — сумма промежуточных значений функций в угловых диагональных точках участка. Импульс по площади поперечного сечения обрабатываемой дорожки получается суммированием по отдельным участкам $I_{str} = \sum_i I_{str}^i$. Импульс по объему прилежащего к сечению слоя материала может быть принят равным произведению импульса по сечению на толщину слоя $V \cdot \Delta t$, где Δt — шаг выдачи результатов при вычислениях по выражениям (4), (5).

Импульс структуризации I_{str} сечения может служить показателем величины энергии, непосредственно затраченной на переход аустенитной структуры в мартенситную, а соответствующий объемный импульс может рассматриваться как некоторая дополнительная характеристика. Переходя от длины $V \cdot \Delta t$ к единице, можно сравнить получаемую величину с максимально возможным на единицу объема удельным импульсом структуризации, пропорциональным величине $T_{plav} - T_{str}$. При этом относительная величина составит $I_{str} / ((T_{plav} - T_{str})t_{str})$, где t_{str} — максимальное из значений времен структуризации, найденных для рассмотренных точек сечения.

На рис. 4 показаны зависимости импульса структуризации в сечении, перпендикулярном траектории движения центра пятна, от скорости движения источника при $T_{str} = 400$ °C, $x_0 = 4$ см.

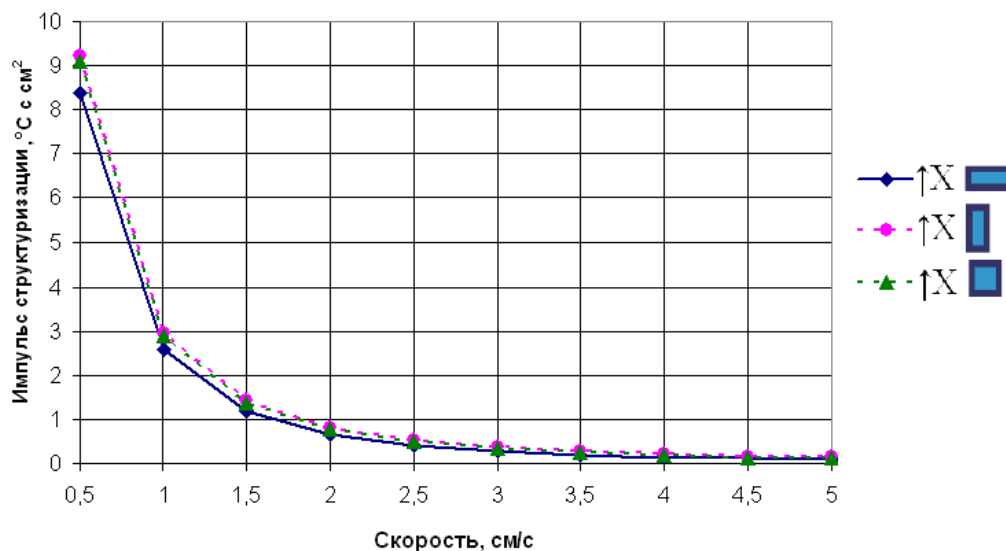


Рис. 4. Зависимости импульса структуризации от скорости движения пятна нагрева в сечении, перпендикулярном оси x , при $x_0 = 4$ см, $P_0 = 1$ кВт

Наиболее резкое снижение импульса структуризации наблюдается в области небольших скоростей источника нагрева. Например, в диапазоне скоростей 0,5–1 см/с импульс падает в 2,5–3 раза.

Сравнение зависимостей, аналогичных приведенным на рис. 2–4, с распределениями по глубине тела характеристик микроструктуры материалов и их микротвердости может позволить установить связь между энергетическим параметром процесса (импульсом структуризации) и реализующимися механическими свойствами материала.

Закключение. Для анализа температурных полей в зоне обработки предложено использование дополнительной характеристики – импульса структуризации. Для различных скоростей движения и форм пятна нагрева определены тепловые импульсы, импульсы структуризации и время структуризации, что расширяет возможность прогнозирования результатов обработки и позволяет оценить, какая часть тепловой энергии расходуется на структурообразование материала в зоне теплового воздействия.

Литература:

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Кокора. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Иванцовский, В. В. Управление структурным и напряженным состоянием поверхностных слоев деталей машин при их упрочнении с использованием концентрированных источников нагрева и финишного шлифования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.09 / В. В. Иванцовский. – Новосибирск, 2012. – 425 с.
3. Веремейчик, А. И. Моделирование тепловых процессов в полупространстве при нагреве движущимся источником с равномерно-распределенным тепловым потоком / А. И. Веремейчик, Б. Г. Холодарь // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 318–330.
4. Веремейчик, А. И. Влияние формы выходного сечения сопла источника высокоэнергетической струи на уровни температуры в зоне термического воздействия / А. И. Веремейчик, Б. Г. Холодарь // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: сб. ст. – Брест: Изд-во БрГТУ, 2022. – С. 217–220.
5. Веремейчик, А. И. Исследование температурных полей при действии сосредоточенного и распределенного стационарного потока на границу полубесконечной среды / А. И. Веремейчик // Механики XXI века. – № 22. – 2023. – С. 300–308.
6. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
7. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1970. – 720 с.

On thermal impulses under the action of a moving local heating source

Verameichyk A.I.^{1,a}, Holodar B.G.^{1,b}

¹Brest State Technical University, Moskovskaya st., 267, 224017, Brest, Belarus

^avai_mrtm@bstu.by, ^bhbg@list.ru

Keywords: heat pulse, structuring, temperature field, heating spot, speed.

The shortcomings of existing methods of linear thermal conductivity, the absence of direct consideration in the calculation scheme of the surface melt zone of the material do not allow for a reliable assessment of the influence of heat treatment modes on the change in the properties of the material, focusing only on the level of the maximum design temperature. In this regard, it is proposed to associate the structuring of the metal in the heat-affected zone with a heat pulse, i.e. the total thermal energy absorbed by the material at a given point in the body, as well as with the effective structuring pulse introduced into consideration, characterizing the energy expended on the process of structural transformations of the material, and the structuring time at a point and a certain volume of the body. The dependences of these quantities on the speed of movement and the shape of the heating spot are presented.

УДК 621.77

Методы исследования износостойкости деталей дробильного оборудования в лабораторных условиях

Мбида Номо Виктор^{1,a}, Штефан Ю. В.^{1,b}

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 125319, Ленинградский проспект, 64, г. Москва, Россия

^acharovictormbida@gmail.com, ^bshtephan_y_v@mail.ru

Ключевые слова: устойчивость к износу, дробильные установки, лабораторные тесты, трибологические соединения, абразивный износ, методики испытаний.

В статье рассматриваются различные методики исследования износостойкости компонентов дробильного оборудования в лабораторных условиях. Особое внимание уделено трибосопряжениям в парах трения, используемых в дробильно-сортировочных установках, а также их влиянию на производительность и качество получаемого щебня. Проведен обзор существующих методов испытаний, включая как стандартизированные подходы, так и адаптированные техники, с анализом их сильных и слабых сторон. Наиболее перспективным признан метод, основанный на спиралевидной траектории трения, однако он требует дальнейшей доработки. Совершенствование лабораторных испытаний позволит увеличить срок службы рабочих элементов дробилок и снизить эксплуатационные расходы.

Цель данных исследований состояла в изучении работы трибосопряжений в парах трения, применяемых в дробильных машинах, для разработки рекомендаций по повышению их износостойкости и долговечности.

Для реализации поставленной цели был разработан план исследований

- Изучение эксплуатационных условий работы трибосопряжений узлах трения дробильных машин.
- Разработка методик лабораторных исследований с учетом реальных условий эксплуатации.

- Апробация методики исследования с проведением лабораторных испытаний образцов материалов ответственных деталей узлов трения дробильных машин на машине трения.

Объектом исследований являются изнашиваемые детали дробильной машины на примере щековой дробилки со сложным движением щеки, широко используемой на первичных стадиях дробления природных и искусственных горных пород [1].

Дробилки для щебня – ключевой элемент ДСО для получения крупного заполнителя из искусственных и природных минеральных материалов различной прочности.

Для измельчения материалов используются различные типы дробилок в зависимости от технических требований к качеству готового продукта и характеристик сырьевых материалов.

- Щековые – для первичного дробления.
- Конусные – для II и III стадий дробления.
- Роторные – для ударного измельчения.
- Центробежно-ударные – для получения однородной фракции на заключительных стадиях дробления.
- Грануляторы – для получения качественного щебня с высокой кубовидностью формы зерна.

Актуальность лабораторных методов испытаний деталей на трение и изнашивание обусловлена зависимостью качества получаемого щебня от величины наработки дробильной машины. Чем выше степень износа рабочих поверхностей быстроизнашиваемых деталей дробильной машины, тем ниже ее производительность и качество получаемого щебня.

Известные стандартные методы испытаний, такие как ASTM G81-97a(2018), предполагают наличие дорогостоящей специализированной лабораторной машины, полностью имитирующей работу щековой дробилки. В современных условиях выживания испытательных лабораторий иметь специальную отдельную машину под столь специфические методы испытаний материалов дробилки не позволительная роскошь. Поэтому поиск методик испытаний в лаборатории путем адаптации универсальных машин в лаборатории является актуальной задачей отечественных производителей дробильного оборудования и запасных частей для них.

Испытание металлов на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы по ГОСТ 17367-71 заключается в том, что испытуемый цилиндрический (пальчиковый) образец прижимается своим торцом к вращающемуся диску с закреплённой на ней абразивной шкуркой и совершает поступательное движение от центра к периферии, оставляя путь трения либо в форме кольца, спирали Архимеда или более сложной фигуры [2,3]. Скорость трения образцов на абразивной шкурке должна быть такой, чтобы нагрев материала в процессе испытаний не влиял на его свойства. Методика требует доработки для испытаний износостойких сталей, используемых для изготовления накладок дробильной машины, путем создания абразивного износостойкого покрытия для ускорения самого испытания в лабораторных условиях и для приближения к реальным условиям изнашивания в присутствии абразива от дробимого каменного материала.

Испытание материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы по ГОСТ 23.208-79 предполагает, что в процессе испытаний на образец действуют абразивные частицы, прижимаемые к образцу с заданным усилием. Однако классические испытания по этим методикам предполагают использование резинового ролика, что никак не моделирует воздействие дробимого материала искусственного или природного происхождения на изнашиваемые элементы дробилки. По этой методике ближе к реальным испытаниям следует рассматривать воздействие пескоструйной или дробеметной машины, а также полочного барабана на изнашиваемые образцы. Аналогичный способ предусматривает и методика ФГУП «ВИАМ», изложенная в работе [4] при испытаниях на эрозионно-абразивное изнашивание.

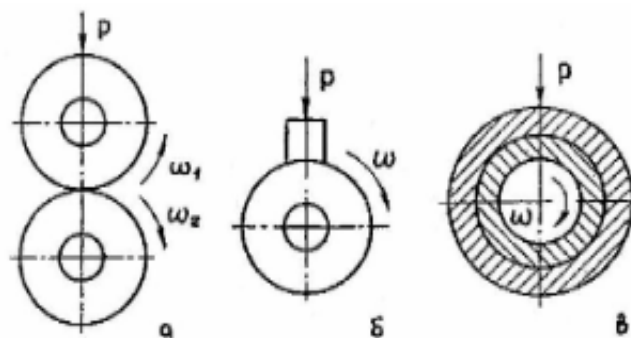


Рис. 1. Схемы, реализуемые на стандартизованных машинах трения:
 а – диск-диск; б – колодка-диск; в – вал-втулка

Анализ стандартных методов испытаний не может близко к реальной машине имитировать трение рабочих органов дробилок об измельчаемый материал. Наиболее близкий по схеме метод испытаний на машине трения – по схеме колодка-диск после его доработки путем создания на поверхности одного из пары трения абразивного износостойкого покрытия.

Методы исследования работы трибосопряжений в парах трения в лабораторных условиях были проанализированы в таблице 1. В ней пронумерованы методики испытаний, наиболее приближенные по нашему мнению к реальной работе деталей дробильных машин в условиях дробления инертных материалов.

Таблица 1

Обзор лабораторных машин трения, применяемых для оценки сыпучих материалов и деталей рабочих органов дробильных машин

№	Вид машины трения	Исполнительный механизм машины
1	 Машина трения МП-22	 Исполнительный механизм, реализующий путь трения по схеме диск-вкладыш
2	 Адаптированная под испытание на трение асфальтосмеситель Akzo Nobel W.T.A.T	 Исполнительный механизм, реализующий путь трения по схеме штифт-диск

3	 Полочный барабан Infratest для испытаний щебня на истираемость	 Цилиндр полочного барабана по ПНСТ 510-2020
4	 Испытательная машина VTI «Нордик тест»	 Шарики для имитации воздействия шипа на дорожное покрытие по ПНСТ 510-2020

Методика под номером 1 в таблице предполагает исследование по схеме колодка-диск (см. рис.1), которую можно использовать для определения величины линейного износа накладок щековых и конусных дробилок.

Методика 2 предполагает изнашивание по пути трения, изображенному на рис. 2. Спиралевидный путь трения, реализуемый на адаптированном нами асфальтосмесителе, способен реализовать схему испытаний по ГОСТ 17367-71. При испытании металлов на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы испытуемый цилиндрический (пальчиковый) образец 1 (рис. 2) прижимается своим торцом к вращающемуся диску 2 с закреплённой на ней абразивной шкуркой 3 и совершает поступательное движение от центра к периферии, оставляя след истирания 4 в виде спирали Архимеда. Скорость трения образцов на абразивной шкурке должна быть такой, чтобы нагрев материала в процессе испытаний не влиял на его свойства.

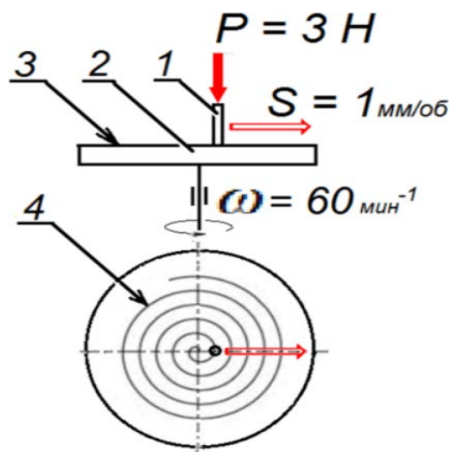


Рис. 2. Схема испытаний на трение о закрепленные абразивные частицы

При этом ГОСТ требует, чтобы твердость абразивных частиц была выше твердости испытуемого материала в 1,5 раза. При твердости стали Гадфильда (высокомарганцовистая сталь марки 110Г13Л) 600НВ необходимо подобрать твердость абразива 900НВ. Это весьма сложно реализовать в лабораторных условиях и поиск таких материалов будет нами продолжен для дальнейшего совершенствования данной методики.

Обзор существующих методов исследования строительных материалов на изнашивание и пылимость показал, что по истиранию в полочном барабане испытывают щебень в лабораторных условиях, как предлагается в патенте РФ [5], широко применяются методы исследования, положенные в основу испытаний инертных материалов на износ. Однако, работа данного механизма мало приближена к работе как самой дробильной машины, так и к воздействию шипа на дорожное покрытие.

Авторы исследования износостойкости дорожных покрытий в работе [6] предлагают моделировать воздействие шипа на изнашивание асфальтобетонных дорог через индекс износа дороги. Данная методика перспективна и при лабораторных исследованиях.

По данным исследователей в работе [7] указано, что методики под номерами 3 и 4 не столь близко моделируют воздействие шипа на асфальтобетонное покрытие. Но для моделирования ударного воздействия незакрепленных частиц на детали дробильной машины они вполне подойдут.

Обсуждение результатов.

Анализ существующих методик оценки износостойкости деталей дробильного оборудования в лабораторных условиях показал, что традиционные испытания не всегда в полной мере отражают реальные эксплуатационные условия. Для повышения долговечности рабочих органов дробилок целесообразно использовать методику под номером 2, реализующую спиралевидный или более сложный путь трения. Данная методика требует дальнейшей доработки с поиском материалов и способов изготовления абразивного диска для адаптированной машины трения. Это позволит сопоставлять в одинаковых условиях лабораторных исследований различных материалов для изготовления рабочих органов дробильных машин: высокомарганцовистые стали 110Г13Л с последующей термообработкой.

Таким образом, разработка и внедрение усовершенствованных методик лабораторных испытаний, помогут увеличить ресурс рабочих органов дробильного оборудования и сравнивать материалы по их износостойкости при работе с различными инертными материалами для дорожного строительства природного и искусственного происхождения. Это, в свою очередь, позволит ускорить поиск оптимальных решений для изготовителей дробильного оборудования, а эксплуатирующим организациям сокращать затраты и предсказывать момент достижения предельной величины износа деталей без ощутимого снижения качества получаемого в процессе дробления щебня.

Литература:

1. Штефан, Ю. В. Математическая модель технологии изготовления кубовидного щебня на основе теории надежности / Ю. В. Штефан, А. Р. Абдуллаев // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2023. № 37. С. 132-138.
2. Investigation of the Wear Resistance of Anticorrosive Organosilicon Coatings under Various Operating Conditions / V. A. Gabysheva, K. O. Venyukov, G. I. Semenov, S. A. Batchayev // Steel in Translation. 2023. Vol. 53. No. 2. P. 107-111.
3. Анализ влияния противогололедных материалов на асфальтобетонные покрытия / В. Б. Бежанова, С. А. Батчаев, В. Ю. Поляков, О. А. Воейко // Инновационные материалы и технологии в транспортном строительстве и дорожном хозяйстве : сборник научных трудов бакалавров и магистров кафедры «Дорожно-строительные материалы» МАДИ. Выпуск 6. М.: ООО "Техполиграфцентр". 2022. С. 100-106.
4. Исследование влияния подготовки поверхности и ассистированного осаждения на структуру и свойства эрозионностойкого ионно-плазменного покрытия / Д. А. Александров, С. А. Мубояджян, П. Л. Журавлева, Д. С. Горлов // Труды ВИАМ. 2018. № 10(70). С. 62-73.
5. Устройство для испытания сыпучих материалов на динамическую прочность и истираемость: пат. 2264609 Рос. Федерация; МПК: 7G01N3/56A / В.С. Бубенщиков, А.Н. Харченко; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Опытно-ремонтный механический завод «Эталон»». № 2004117553/28; заявл. 28.05.2004; опубл. 2005, бюл. 4. - 4с
6. Валгузов, Д. И. Влияние шипованных шин на состояние дорожного покрытия / Д. И. Валгузов, А. Д. Васильев, Л. П. Кузнецова // Современные материалы, техника и технология : сборник научных статей 10-й Международной научно-практической конференции, Курск, 30 декабря 2020 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет. 2020. С. 102-105.
7. Гайфутдинов Рустем Флюсович, Хафизов Эдуард Радикович Апробация существующих методов оценки износостойкости щебня на примере каменных материалов, используемых в Республике Татарстан // Известия КазГАСУ. 2019. №4 (50). С. 427-433.

Methods for studying the operation of tribo-conjugations in friction pairs in laboratory conditions

Mbida Nomo Victor^{1,a}, Shtephan Yu.V.^{1,b}

¹Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Leningradsky Prospekt, 64, 125319, Russian Federation

^acharovictormbida@gmail.com, ^bshtephan_y_v@mail.ru

Keywords: wear resistance, crushing equipment, laboratory testing, tribological contacts, abrasive wear, testing methods.

The article examines various methods for studying the wear resistance of crushing equipment components under laboratory conditions. Special attention is given to tribological contacts in friction pairs used in crushing and screening machines, as well as their impact on performance and the quality of the resulting crushed stone. A review of existing testing methods is conducted, including both standardized approaches and adapted techniques, with an analysis of their advantages and limitations. The most promising method is identified as the one based on a spiral friction trajectory, though it requires further refinement. Improving laboratory testing procedures will help extend the lifespan of crusher components and reduce operating costs.

УДК 621.77

Технологические способы повышения износостойкости деталей дробильного оборудования

Мбида Номо Виктор^{1,a}, Штефан Ю.В.^{1,b}

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 125319, Ленинградский проспект, 64, г. Москва, Россия

^acharovictormbida@gmail.com, ^bshtephan_y_v@mail.ru

Ключевые слова: трибосопряжения, пары трения, лабораторные испытания, абразивное изнашивание, износостойкость, дробильно-сортировочные машины, узлы трения, эксплуатационные условия, методика испытаний, машина трения.

***Аннотация:** В статье рассмотрены лабораторные методы исследования изнашиваемых поверхностей деталей рабочих органов дробильного оборудования с целью повышения их износостойкости. Исследования включают испытание металлов на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы, а также оценку износостойкости материалов при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы, что позволяет моделировать реальные условия эксплуатации. В рамках работы анализируются эксплуатационные режимы деталей рабочих органов дробильных машин, разрабатываются и апробируются методики лабораторных испытаний на машинах трения, что способствует повышению точности моделирования условий работы деталей для оценки свойств материалов и оптимизации конструктивных решений для увеличения срока службы оборудования.*

Как показывает опыт эксплуатации щековых дробилок, срок службы накладок рабочих органов, как правило, не превышает 600 часов [1]. Требуемые стандартами на дробильно-сортировочные машины (ДСО) гарантийные сроки эксплуатации не ниже 18 мес. не распространяется на быстро изнашиваемые элементы ДСО. В то же время, к примеру, для щековых дробилок по ГОСТ 27412-93¹ критерием предельного состояния, определяющим необходимость капитального дорогостоящего ремонта, является необходимость замены или ремонта подвижной щеки.

Поэтому поиск технологических способов изготовления деталей рабочих органов дробильных и сортировочных машин для повышения их износостойкости является актуальной задачей современной триботехники. Следует использовать адаптированные методы испытаний таких деталей на показатели износостойкости для выбора наиболее предпочтительных видов материалов и их технологических переделов еще на стадии проектирования и лабораторных научных изысканий, поскольку известные методики не позволяют реализовать реальную работу рабочих органов ДСО в лабораторных условиях.

Особенность абразивного изнашивания стали 110Г13Л, получившей свое название в честь её создателя Р.А. Гадфильда, которая широко используется для изготовления быстроизнашиваемых компонентов дробильного и измельчительного оборудования, таких как била, молотки, футеровки, а также элементы дробилок и мельниц [1,2], заключается в том, что воздействие на детали такого вида эксплуатационных факторов весьма сложно поддаются моделированию в лабораторных условиях.

Причины использования этой стали предельно просты и заключаются в возможности достижения высокой ее твердости до 600 НВ. Но, как свидетельствует наука трибология, не всегда повышение твердости способствует росту износостойкости. Однако, как указано в работе [5], на практике установлена четкая корреляция между твердостью НВ, достигаемой в

¹ ГОСТ 27412-93 Дробилки щековые. Общие технические условия

результате пластической деформации, и износостойкостью некоторых сталей. Долговечность рабочих элементов горно-обогатительного оборудования можно существенно увеличить, применяя технологии горячей обработки давлением с последующей закалкой. Превышение допустимой величины износа массивных деталей дробилок непременно ведет к снижению качества получаемого материала и простоям оборудования в ожидании замены дорогостоящих деталей дробилок.

Выполненный нами обзор методов испытаний таких деталей на износостойкость показал, что при многовариантности путей решения задачи и технологических способов повышения износостойкости в научном сообществе нет единого подхода к методике испытаний и обработке результатов измерений. Все они сведены в итоге к относительному увеличению износостойкости в конкретных условиях лабораторных или производственных сопоставлений. Необходим единый научный подход для получения результатов повышения износостойкости деталей дробилок в сопоставимых по абсолютной величине единицах.

Технологические способы повышения износостойкости и методики испытаний.

В работе [1] предложено для повышения износостойкости высокомарганцовистых сталей, используемых для производства деталей щековых дробилок, компенсировать воздействие ударного износа при сохранении ударной вязкости за счет применения термообработки отливок при температуре на $250...300\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше линии выделения карбидов из аустенита с последующей выдержкой при температуре на $1280...1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ с закалкой в воде. При этом получено увеличение ударной износостойкости на 90%. Однако при этом способе происходит слишком быстрая потеря заданной геометрии после выбивки детали при резком перепаде температуры, а также высокая скорость охлаждения при пониженных температурах, что приводит к возникновению больших структурных напряжений и создает опасность возникновения трещин и в следствие этого, происходит растрескивание и коробление деталей, что приводит к ускоренному изнашиванию после их охлаждения, и, как следствие, с дальнейшей потребностью в дополнительной механической обработке детали.

Для повышения срока службы на 77 часов предлагается авторами патента при изготовлении щек методом штамповки выдерживать деталь из высокомарганцовистой стали в печи в течение $2,1...2,3\text{ ч}$ при $1100...1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ с последующей штамповкой на прессе 200 МН и закалкой в воде.

Один из методов повышения износостойкости стальных изделий основан на диффузионном насыщении их поверхности титаном из легкоплавких жидкометаллических растворов. При этом детали в этой технологии их изготовления выдерживаются в расплаве свинца или свинцово-висмутного сплава, содержащем растворенный титан. Титановая адсорбция на поверхности сопровождается его диффузией вглубь материала, а поскольку титан является сильным карбидообразующим элементом, он взаимодействует с углеродом цементита стали, образуя твердые карбиды титана, которые придают покрытию высокую износостойкость и коррозионную стойкость. Однако этот метод может привести к образованию сколов при охлаждении, из-за наличия в составе высокомарганцовистых сталей углерода [2].

В работе [3] проведены комплексные испытания износостойкой аустенитной метастабильной стали, включающие термическую обработку, абразивное изнашивание и измерение твердости. Термообработка осуществлялась по нескольким режимам: отпуск при $620\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 8 часов, нормализация при $960\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (4,5 часа) с последующим отпуском при $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ (8 часов), а также закалка при $1030-1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ с последующим охлаждением в воде и дробеструйной обработкой. Для оценки износостойкости использовалась пескоструйная установка, позволяющая проводить испытания методом абразивного изнашивания с углом атаки 80° , что обеспечивало моделирование реальных условий эксплуатации в абразивной среде. Измерение твердости проводилось методом Виккерса путем четырехкратного вдавливания закаленного шарика диаметром 10 мм с усилием 30 Н, после чего анализировалась твердость в центре отпечатка. Полученные результаты показали, что сталь с аустенитно-мартенситной структурой демонстрирует наибольшую устойчивость к

абразивному изнашиванию, а аустенитная структура, благодаря способности к упрочнению под нагрузкой, также проявляет хорошие эксплуатационные характеристики при абразивно-ударных нагрузках.

В работе [4] предложена методика испытаний материалов для упрочнения рабочих органов дробилок молоткового типа на стойкость к абразивному и ударному изнашиванию. Была разработана специальная установка, позволяющая снижать затраты на исследования, реализующая широкий спектр изменения линейной скорости движения образцов на установке. Этот путь видится наиболее перспективным, поскольку его можно использовать не только для исследования рабочих органов дробильного оборудования, но и других образцов в зависимости от реализуемой программы исследований.

Испытания износостойких сталей.

В работе [5] приведен обзор методов испытаний на износостойкость деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания. Отмечена перспективность нанесения на поверхность молотков покрытий методами электроискрового легирования и холодного газодинамического напыления. Представлены механизмы формирования покрытий различными методами. Отражены характеристики выпускаемого и применяемого оборудования для реализации заданных процессов.

В исследовании [6] изучены особенности абразивного изнашивания стали 110Г13Л, которая широко применяется для изготовления быстро изнашиваемых деталей дробильного и измельчительного оборудования, включая била, молотки и футеровки. Рассмотрены возможные пути повышения ее износостойкости, в том числе технологии высокотемпературного деформирования методом свободнойковки и эксперименты по абразивному изнашиванию образцов. Полученные результаты подтверждают, что твердость и стойкость к износу высокомарганцевистой стали напрямую зависят от степени пластической деформации, которой она подвергается перед закалкой. При увеличении интенсивности деформации эти характеристики заметно улучшаются, а в случае максимального воздействия износостойкость материала может возрасти до 70% по сравнению с неизменным исходным состоянием.

В работе [7] исследованы особенности абразивного износа стали 110Г13Л (Гадфильда), которая является основным материалом для быстроизнашиваемых деталей дробильного и измельчительного оборудования, таких как била, молотки, футеровки, а также элементы дробилок и мельниц. Рассмотрены различные методы повышения ее износостойкости, включая технологию высокотемпературного деформирования свободнойковкой с использованием гидравлического кузнечного молота, а также проведены испытания на абразивное изнашивание образцов. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что твердость и сопротивляемость износу высокомарганцевистой стали зависят от предварительной пластической деформации (интенсивности укова), причем с увеличением этого параметра данные характеристики существенно улучшаются. Максимальная степень пластической деформации позволяет повысить износостойкость стали на 70 % по сравнению с материалом, не подвергавшимся предварительной обработке. Установлена четкая взаимосвязь между износостойкостью стали и ее твердостью НВ, полученной в результате пластического деформирования. Авторы приходят к выводу, что значительно продлить срок службы быстроизнашиваемых компонентов горно-обогатительного оборудования можно за счет их изготовления с применением горячей обработки давлением, сопровождаемой последующей закалкой.

Влияние пластической деформации на износостойкость.

В работе [8] исследованы особенности абразивного изнашивания стали 110Г13Л. Рассмотрены различные методы повышения её износостойкости, включая технологию высокотемпературного деформирования с применением свободнойковки, а также проведены экспериментальные исследования процессов абразивного изнашивания. По результатам испытаний установлено, что твердость и стойкость к износу этой высокомарганцевистой стали напрямую зависят от степени пластической деформации, которой она подвергается

перед закалкой: чем выше интенсивность деформации, тем значительно улучшаются эти характеристики. Максимальная степень пластического упрочнения позволяет увеличить износостойкость стали до 70% по сравнению с материалом, не подвергавшимся предварительной деформации.

Обсуждение результатов.

Вопросами повышения износостойкости рабочих элементов горнообогатительных машин занимались многие отечественные ученые, такие как Болобов В.И., Мишин И.И., Соколов А.Г. и др. Однако вопросы методики испытаний, приближенные к реальным условиям эксплуатации так и не были разработаны. Следует используя современные научные подходы и стандартизованные методы определения пути трения, основываясь на технологические методы повышения износостойкости деталей разработать комплексный подход к выбору способа обработки материалов изнашиваемых деталей в зависимости от применяемого материала.

Анализ существующих методик оценки износостойкости деталей дробильного оборудования в лабораторных условиях показал, что традиционные испытания не всегда в полной мере отражают реальные эксплуатационные условия. Для повышения долговечности рабочих органов дробилок целесообразно использовать комплексный подход, включающий как совершенствование материалов, так и оптимизацию режимов термической и механической обработки.

Исследования подтвердили, что высокомарганцовистая сталь 110Г13Л обладает значительным потенциалом для улучшения эксплуатационных характеристик при условии предварительной пластической деформации с последующей термообработкой. Доказано, что увеличение интенсивности деформации перед закалкой способствует росту твердости и износостойкости стали, что может продлить срок службы деталей на 70% по сравнению с необработанным материалом.

Кроме того, перспективным направлением является применение методов диффузионного насыщения поверхности титаном, что способствует формированию твердых карбидных соединений, устойчивых к абразивному износу. Однако данный подход требует индивидуального подбора параметров для различных типов сплавов, чтобы избежать возникновения хрупких фаз, снижающих механическую прочность.

Таким образом, разработка и внедрение усовершенствованных методик лабораторных испытаний, а также применение инновационных технологий обработки и легирования материалов позволяют значительно увеличить ресурс рабочих органов дробильного оборудования. Это, в свою очередь, способствует снижению эксплуатационных затрат и повышению эффективности производственных процессов.

Литература:

1. Патент № 2800258 С1 Российская Федерация, МПК В02С 1/10. Способ изготовления износостойких дробящих плит щековых дробилок : № 2022132279 : заявл. 09.12.2022 : опубл. 19.07.2023 / В. И. Болобов, Ю. С. Иванов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет"..
2. Соколов А.Г. Повышение эксплуатационных свойств инструмента методами диффузионной металлизации / А. Г. Соколов, В. П. Артемьев; Сев.-Кавк. науч. центр высш. шк., Кубан. гос. технол. у-т. - Ростов н/Д : Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. – 228с.
3. Патент № 2710760 С1 Российская Федерация МПК С22С 38/58 (2006.01). Износостойкая метастабильная аустенитная сталь: № 2019132077: заявл. 10.10.2019: опубл. 13.01.2020 / заявитель Акционерное общество "Научно-производственное объединение "Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения", АО "НПО "ЦНИИТМАШ", Общество с ограниченной ответственностью "ГАН" ООО "ГАН"
4. Суrowицкий И.И., Терентьев В.В., Баусов А.М. Установка для исследования износостойкости рабочих органов дробильного оборудования в условиях абразивного изнашивания // Наука и молодежь: новые идеи и решения в АПК Иваново, 30 апреля 2021 года Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. акад. Д.К. Беляева, г. Иваново. 2021. С. 355-360.

5. Терентьев В.В, Суровицкий И.И., Терентьев И.А, Баусов А.М, Максимовский Ю.М. Существующие методы повышения ресурса молотков дробильного оборудования // Аграрная наука в условиях модернизации и инновационного развития АПК России. Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием посвященная 90-летию ФГБОУ ВО Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. акад. Д.К. Беляева, Том II: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференций – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА, 2020. С. 168-172.

6. Болобов В.И., Бочков В.С., Мишин И.И., Неструев А.А. О влиянии режимов термомеханической обработки на износостойкость материалов быстроизнашиваемых элементов горно-обогатительного оборудования // ГИАБ. 2017. №1. С. 52-59.

7. Мишин И.И, Болобов В.И, Чупин С.А, Бочков В.С Повышение износостойкости материалов быстроизнашиваемых элементов горно-обогатительного оборудования методом высокотемпературной термомеханической обработки // Горное оборудование и механика. 2017. №3. С. 20-23.

8. Болобов В.И, Бочков В.С, О возможности повышения износостойкости быстроизнашиваемых элементов горно-обогатительного оборудования термомеханической обработкой // Записки Горного института. Том 221. 2016. С.688-691. DOI10.18454/PMI.2016.5.688

Methods for studying the operation of tribo-conjugations in friction pairs in laboratory conditions

Mbida Nomo Victor^{1,a}, Shtephan Yu.V.^{1,b}

¹Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Leningradsky Prospekt, 64, 125319, Russian Federation

^acharovictormbida@gmail.com, ^bshtephan_y_v@mail.ru

Keywords: triboacoplamentos, friction pairs, laboratory tests, abrasive wear, wear resistance, crushing and screening machines, friction units, operating conditions, test procedure, friction machine.

The article discusses laboratory methods for studying tribo-stresses in friction pairs used in crushing and screening machines (DSO) in order to increase their wear resistance. The research includes testing metals for abrasive wear when rubbing against fixed abrasive particles, as well as evaluating the wear resistance of materials when rubbing against loosely fixed abrasive particles, which makes it possible to simulate real-world operating conditions. As part of the work, the operational modes of the DSO friction units are analyzed, laboratory test methods are being developed and tested on the friction machine, which ensures the accuracy of evaluating the properties of materials and helps optimize structural solutions to increase the service life of the equipment.

УДК 621.01:621.891

Плотность зазоров при контактировании шероховатой поверхности с упругим полупространством

Кожевников А.С.^{1,a}, Маргарян Д.Э.^{1,b} Сангзода А.С.^{1,c}

¹Братский государственный университет, уд. Макаренко, 40, Братск, Россия

^akozhevnikovart@inbox.ru, ^bjerocko72@gmail.com, ^cadam.saidov.1999@bk.ru

Ключевые слова: шероховатая поверхность; слоистое упругое полупространство, объем зазоров; плотность стыка.

Рассмотрен контакт жесткой шероховатой поверхности с однородным полупространством. Получена система трансцендентных уравнений, позволяющая определить зависимость плотности зазоров в стыке Λ_c в зависимости от параметров шероховатости, свойств материала и приложенной нагрузки.

Воспользуемся дискретной моделью шероховатости, в которой микронеровности представлены в виде одинаковых сферических сегментов, распределение которых по высоте соответствует опорной кривой профиля реальной поверхности [1]. Для описания опорной кривой используем распределение неполной бета-функции:

$$\eta(\varepsilon) = \frac{B_\varepsilon(\alpha, \beta)}{B(\alpha, \beta)},$$

где $B_\varepsilon(\alpha, \beta)$, $B(\alpha, \beta)$ – соответственно неполная и полная бета-функции; α и β определяются высотными параметрами шероховатости.

В этом случае плотность функции распределения неровностей по высоте:

$$\varphi'_n(u) = \frac{u^{\alpha-2}(1-u)^{\beta-2}[(\alpha-1)(1-u)(\beta-1)u]}{\varepsilon_s^{\alpha-1}(1-\varepsilon_s)^{\beta-1}},$$

где ε_s определяется из условия $\varphi_n(\varepsilon_s) = 1$; $\omega R_{\max}$ – высота сферического сегмента, $\omega = 1 - \varepsilon_s$.

Радиус сферического сегмента:

$$r = \frac{a_c^2}{2\omega R_{\max}}. \quad (1)$$

где a_c — радиус основания сферического сегмента.

Для нахождения объема межконтактного пространства необходимо определить объемы зазоров, приходящиеся на отдельные контактирующие и не контактирующие неровности:

$$V_c = \begin{cases} V_{ri} = 2\pi \int_{a_{ri}}^{a_c} [z_{10}(\rho) - z_{20}(\rho)] \rho d\rho, \\ V_{oi} = 2\pi \int_0^{a_{ci}} [z_{1r}(\rho) - z_{2r}(\rho)] \rho d\rho, \end{cases} \quad (2)$$

где z_{10} и z_{20} – уравнения, описывающие поверхности не контактирующих неровностей и полупространства; z_{1r} и z_{2r} – уравнения, описывающие поверхности контактирующих неровностей и полупространства.

Тогда общий объем межконтактного пространства в стыке:

$$V_c = \sum_{i=1}^{n_r} V_{ri} + \sum_{i=1}^{n_c - n_r} V_{oi},$$

а соответствующая ему плотность зазоров:

$$\Lambda(\varepsilon) = \frac{1}{A_{ci} R_{\max}} \left[\int_0^{\min(\varepsilon, \varepsilon_s)} V_{ri} \varphi'_n(u) du + \int_{\min(\varepsilon, \varepsilon_s)}^{\varepsilon_s} V_{oi} \varphi'_n(u) du \right]. \quad (3)$$

Учитывая, что $V_{ri} = A_{ci} R_{\max} \Lambda_{ri}$ и $V_{oi} = A_{ci} R_{\max} \Lambda_{oi}$, выражение (3) можно также представить в виде:

$$\Lambda(\varepsilon) = \int_0^{\min(\varepsilon, \varepsilon_s)} \Lambda_{ri} \varphi'_n(u) du + \int_{\min(\varepsilon, \varepsilon_s)}^{\varepsilon_s} \Lambda_{oi} \varphi'_n(u) du. \quad (4)$$

Определим уравнения, описывающие поверхности неровностей и полупространства, входящие в выражения (4).

На схеме контакта единичной неровности (рис. 1) индекс 1 относится к неровности, индекс 2 – к полупространству. В исходном положении уравнение сечения i -й неровности:

$$z_{10} = uR_{\max} + \frac{\rho^2}{2r} = uR_{\max} + \frac{\omega R_{\max} \rho^2}{a_c^2},$$

полупространства — $z_{20} = 0$.

При смещении неровности на величину $\varepsilon < u$ контакта с полупространством не произойдет. Тогда для не контактирующей неровности:

$$z_{10} = \omega R_{\max} \left(x^2 + \frac{u - \varepsilon}{\omega} \right),$$

где $x = \rho/a_c$.

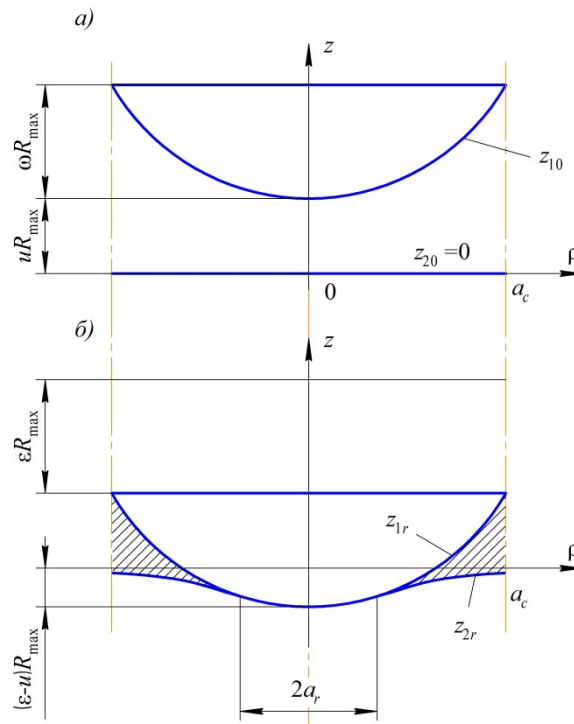


Рис. 1. Схема контакта единичной сферической неровности: а) исходное положение; б) смещение неровности на величину $\omega R_{\max}$

При смещении неровности на величину $\varepsilon > u$ произойдет ее контакт с полупространством. Тогда для контактирующей неровности:

$$z_{1r} = \omega R_{\max} \left(x^2 - \frac{\varepsilon - u}{\omega} \right).$$

Распределение давления по площади контакта является «герцевским», т. е.:

$$p(\rho) = p_0 \left(1 - \frac{\rho^2}{a_r^2} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{3}{2} p_m \left(1 - \frac{\rho^2}{a_r^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

где p_0 и p_m – соответственно максимальное и среднее давление на площадке контакта.

Согласно данным [2] перемещения полупространства от действия нагрузки вида (5):

$$z_{2r} = u_z = -\frac{p_m}{E^*} \cdot \frac{a_r^2}{\rho} {}_2F_1 \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; \frac{5}{2}; \frac{a_r^2}{\rho^2} \right),$$

где ${}_2F_1(a, b; c; z)$ — гипергеометрическая функция Гаусса.

Учитывая, что $a_r^2/a_c^2 = \eta_i$, имеем:

$$z_{2r} = -\frac{p_{mi}a_c}{E^*} \cdot \frac{\eta_i}{x} {}_2F_1\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; \frac{5}{2}; \frac{\eta_i}{x^2}\right).$$

Из формул Герца с учетом (1) получим:

$$\frac{p_{mi}}{E^*} = \frac{8\eta_i^{0.5}}{3\pi} \cdot \frac{\omega R_{\max}}{a_c}.$$

Тогда:

$$z_{2r} = -\frac{8\eta_i^{1.5}}{3\pi} \cdot \frac{\omega R_{\max}}{x} {}_2F_1\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; \frac{5}{2}; \frac{\eta_i}{x^2}\right).$$

Для упругого контакта неровностей [1]:

$$\eta_i = \eta_i(\varepsilon, u) = \frac{\varepsilon - u}{2\omega}.$$

Интегрируя выражения (2) с учетом уравнений сечений контактирующих и не контактирующих неровностей и полупространства, имеем:

$$\frac{V_{0i}}{\pi a_c^2 R_{\max}} = \Lambda_{0i} = \omega \left(\frac{1}{2} - \frac{\varepsilon - u}{\omega} \right); \quad (6)$$

$$\frac{V_{ri}}{\pi a_c^2 R_{\max}} = \Lambda_{ri} = \omega \left(\frac{1}{2} - \frac{\varepsilon - u}{\omega} (1 - \eta_i) - 2\eta_i^2 + \frac{16\eta_i^{1.5}}{3\pi} {}_2F_1\left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; \frac{5}{2}; \eta_i\right) \right). \quad (7)$$

Подставляя полученные выражения (6) и (7) в (4), можно определить плотность зазоров в стыке $\Lambda(\varepsilon)$ в зависимости от относительной величины ε .

Для данной модели шероховатости среднее контактное давление, приложенное к стыку [1]:

$$q_c(\varepsilon) = \int_0^{\min(\varepsilon, \varepsilon_s)} q_{ci}(\varepsilon) \varphi'_n(u) du.$$

Учитывая, что $q_{ci} = q_{mi}\eta_i$, получим:

$$\frac{q_c a_c}{E^* \omega R_{\max}} = F_q = \frac{8}{3\pi} \int_0^{\min(\varepsilon, \varepsilon_s)} \eta_i^{1.5}(\varepsilon, u) \varphi'_n(u) du. \quad (8)$$

Таким образом, с использованием дискретной модели шероховатости, получены выражения для определения плотности зазоров в стыке. При этом учтены перемещения полупространства при контактировании каждой отдельной неровности.

В дальнейшем методика определения плотности зазоров при контактировании жесткой шероховатой поверхности с однородным материалом будет применена для контакта шероховатой поверхности со слоистым упругим полупространством.

Литература:

1. Огар П.М., Тарасов В.А. Проектирование затворов специальной трубопроводной арматуры. Братск: Изд-во БрГУ, 2014. 191 с.
2. Огар П.М., Тарасов В.А. Влияние формы осесимметричной нагрузки на напряженно-деформированное состояние упругопластического полупространства // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 5. С. 14-20.

The gap density when a rigid rough surface is in contact with an elastic half-space

Kozhevnikov A.S.^{1,a}, Margaryan D.E.^{1,b}, Sangzoda A.S.^{1,c}

¹Bratsk State University, room. Makarenko, 40, Bratsk, Russia

^akozhevnikovart@inbox.ru, ^bjerocko72@gmail.com, ^cadam.saidov.1999@bk.ru

Keywords: rough surface; layered elastic half-space, volume of gaps; joint density.

The contact of a rigid rough surface with a homogeneous half-space is considered. A system of transcendental equations is obtained, which makes it possible to determine the dependence of the gap density in the joint depending on the roughness parameters, material properties and applied load.

УДК 620.17

Распределение контактного давления при внедрении сферического индентора в упругопластическое полупространство

Карьялайнен Н.В.^{1,a}, Обухов З.Д.^{1,b}, Шилин В.А.^{1,c}

¹Братский государственный университет, уд. Макаренко, 40, Братск, Россия

^aalybeliw@mail.ru, ^bObukhov.99@mail.ru, ^cwal-500@yandex.ru,

Ключевые слова: сферический индентор, упругопластическое полупространство, распределение контактного давления, кривая нагружения, кривая разгрузки.

Приведено обоснование подхода к определению функции распределения давления на поверхности контакта при внедрении сферического индентора в упругопластическое полупространство. Предложена концептуальная модель процесса кинетического индентирования сферы, согласно которой в процессе нагружения сферы в результате процессов упругой и пластической деформаций формируется распределение давления в контакте сферы с материалом, которое определяется уравнением кривой нагружения. При разгрузке сферы величина перемещений восстанавливаемой поверхности равна перемещениям восстанавливаемого упругого полупространства после действия на него искомого распределения давления. При повторном нагружении сферы перемещения восстановленной поверхности будут эквивалентны перемещениям упругого полупространства при действии на него искомого распределения давления. Получены выражения для распределения контактного давления при внедрении сферы в упругопластическое полупространство.

Введение. Исторически испытания материалов на вдавливание сферы в начале прошлого века использовались для определения их твердости [1, 2]. Очевидно на появление этих работ оказало влияние понятие абсолютной твердости Г. Герца, решившего в 1881 г. задачу об упругом контакте шара и плоскости. С середины прошлого века начали появляться исследования по определению модуля упругости и других механических свойств [3-9], которые привели к появлению метода кинетического индентирования. Методика определения модуля упругости основана на уравнении Булычева – Алехина – Шоршорова (в зарубежной литературе – equation BASH) для жесткости начальной части кривой разгрузки, которое имеет вид

$$S = \left. \frac{dP_e}{dh_e} \right|_{h_e=h_m} = \frac{2\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}} \cdot E^*, \quad (1)$$

где A – проекция площади контакта индентора с материалом, E^* – приведенный модуль упругости;

$$E^* = \left(\frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \right)^{-1}, \quad (2)$$

ν , ν_i и E , E_i – коэффициенты Пуассона и модули упругости материала и индентора.

Подробный анализ упругого вдавливания осесимметричных инденторов изложен авторами [10]. Для практических целей жесткость начальной части кривой разгрузки представлена выражением

$$S = 2E^*a, \quad (3)$$

где a – радиус площадки контакта.

Однако, как отмечено в нашей недавней работе [11], ввиду определенной неудовлетворенности при определении модуля упругости и радиуса площадки контакта в уравнение (3) вводятся различные корректирующие и поправочные коэффициенты и параметры [12-18], например в работе [12]

$$S = \beta_c 2E^*a, \quad (4)$$

где β_c – корректирующий фактор.

В результате проведенных исследований для жесткости начальной части кривой разгрузки авторами [11] предложено следующее выражение

$$S = \frac{\pi\gamma}{K_\beta} E^*a, \quad (5)$$

где γ – экспонента кривой разгрузки

$$\gamma = \gamma(\bar{a}) = \frac{1 + 2\sqrt{1 - \bar{a}^2}}{1 + \sqrt{1 - \bar{a}^2}}, \quad (6)$$

$\bar{a} = a/R$, R – радиус сферического индентора, для небольших значений $\bar{a}$ величина $\gamma \approx 1.5$;

$$K_\beta = K_\beta(\beta) = 2^{2\beta+1}(1+\beta)V(\beta+1, \beta+1), \quad (7)$$

$V(x_1, x_2)$ – бета- функция: $\beta+1 = \alpha$, α – экспонента в уравнении кривой нагружения

$$P(h) = C_l h^\alpha. \quad (8)$$

По своей физической сущности параметр β является экспонентой в уравнении распределения давления $p(r)$ на поверхности контакта в нагруженном состоянии индентора при его упругопластическом внедрении

$$p(r) = p_0(1 - r^2/a^2)^\beta, \quad (9)$$

где $\beta = \alpha - 1$, $p_0 = p_m(\beta + 1)$, $p_m = P/(\pi a^2)$ – среднее давление в контакте.

Для герцевского распределения контактного давления: $\beta = 0.5$, $K_\beta = 3\pi/4$, $S = 2E^*a$; для равномерного давления: $\beta = 0$, $K_\beta = 2$, $S = (3\pi/4)E^*a = 2.3562 \cdot E^*a$.

Следует отметить, что выражение (5) для жесткости начальной части кривой разгрузки ранее было получено в работе [19] в результате определения корректирующего фактора β_c для уравнения (4).

Целью настоящей работы является более подробное обоснование подхода к определению функции распределения давления на поверхности контакта при внедрении сферического индентора, так как в [11] для объяснения этого вопроса авторы ограничились ссылкой на ранее проведенные исследования коллектива.

Таким образом, настоящая работа является дополнением к исследованиям [11].

Методологические аспекты. Для описания процесса разгрузки индентора и повторного нагружения в технической литературе широко используется теория упругого контакта Герца. В качестве примера можно привести известные монографии по механике контактного взаимодействия [20-22], монографии по диагностике механических свойств материалов [23, 24], работы ученых национального исследовательского университета “МЭИ” [25, 26], китайских ученых [27, 28]. Для всех приведенных публикаций характерным является использование “герцевского” распределение контактного давления (уравнение (9) при $\beta = 0.5$). Такой результат можно объяснить следующим образом. Теория Герца предполагает следующие допущения: 1) поверхности тел гладкие и несогласованные (по определению [20]); 2) характерный размер области контакта $a \ll R$, где R – относительный радиус кривизны; 3) деформации малы; 4) каждое из контактирующих тел рассматривается как упругое полупространство; 5) трение отсутствует.

Подробно контакт двух упругих тел, изначально касающихся в точке, рассмотрен в [29, с. 74]. Вначале вводят систему декартовых координат, связанную с общей касательной плоскостью к поверхностям упругих тел в точке их касания. После разложения функций, описывающих соприкасаемые поверхности, по формуле Маклорена и пренебрегая членами более высокого порядка малости, получаем соприкосновение их параболоидов второго порядка, так как разложение начинается с квадратичных членов.

Таким образом применение теории Герца к упругому контакту при повторном нагружении индентора сводится к контакту двух параболоидов второго порядка с относительной кривизной

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R} - \frac{1}{R_0}, \quad (10)$$

где R – радиус сферического индентора, R_0^{-1} – кривизна восстановленной лунки, обычно определяемая из радиуса и глубины остаточной лунки.

Для такого контакта распределение давления описывается уравнением (9) при $\beta = 0.5$, из которого находят нормальные перемещения [20], а затем радиус области контакта

$$a = \frac{\pi p_0 R}{2E^*}, \quad (11)$$

и взаимное сближение двух тел

$$\delta = \frac{\pi a p_0}{2E^*}. \quad (12)$$

Полная сжимающая нагрузка

$$P = \frac{2}{3} p_0 a^2. \quad (13)$$

Для решения практических задач удобно задаваться полной нагрузкой и определять параметры a , δ и p_0 по выражения Герца для параболоидов второго порядка, полученным из (11) – (13).

По поводу использования теории Герца для описания процесса разгрузки в работе [20, с. 210] указано, что такой подход является приближенным, поскольку неявно предполагалось, что перед разгрузкой имеет место “герцевское” распределение давлений, а восстановленный профиль в связи с этим есть дуга окружности. В действительности распределение давлений является более равномерным, чем ‘герцевское’ распределение.

Аналогичный результат получили авторы [30, с. 69], которые указывают на проверку ими допущения в работе [3] о том, что характер распределения давлений на площадке отпечатка не зависит от свойств материала и степени деформации в отпечатке. Результаты эксперимента показали, что это допущение при определении модуля упругости может изменять его истинное значение на 10...20 %. Реальное распределение давления находится между равномерным распределением и распределением по полушару, реализуемом при упругом вдавлении шара.

В работе [30, с. 15] также показано, что радиус кривизны по поверхности восстановленной лунки с $\bar{a} = 0.66$ может отличаться почти в два раза, причем в центре и на периферии лунки радиус кривизны больше, чем между ними. Это опровергает гипотезу о том, что восстановленный профиль есть дуга окружности и снижает достоверность результатов при использовании теории Герца для описания процесса разгрузки, что характерно для перечисленных выше работ [25, 26]. Причем при определении модуля упругости в указанных работах достаточно единичного внедрения индентора с фиксацией приложенного усилия, максимальной глубины внедрения и глубины восстановленной лунки. В работе [25] приводятся данные уравнения кривой нагружения, однако при определении модуля упругости они не используются.

В исследованиях [27, 28] был использован анализ Снеддона [5]. Внедрение сферического индентора в сферическую лунку описывается выражением

$$h = \frac{a}{2} \left(\log \frac{R+a}{R-a} - \log \frac{R_0+a}{R_0-a} \right), \quad (14)$$

Разлагая выражение (14) в ряд Тейлора и отбрасывая члены высшего порядка малости, также как в [29], получим выражение для контакта двух параболоидов второго порядка с эквивалентным радиусом (10) и приведенным модулем упругости

$$E^* = \frac{S}{2\sqrt{hR^*}}. \quad (15)$$

Здесь глубина внедрения индентора h и жесткость начальной части кривой разгрузки S определяются из диаграммы кинетического индентирования. Модуль упругости материала находят из выражения (2).

О выравнивании распределения давления на поверхности контакта при упругопластическом внедрении инденторов указано в работе [12] при представлении концепции “эффективной формы индентора” для конических и пирамидальных инденторов, хотя для определения жесткости кривой разгрузки авторы используют теорию Герца. Авторы утверждают, что с фундаментальной точки зрения форму эффективного индентора можно оценить, сделав простые предположения о распределении давления под индентором. Давление, возникающее при нагружении, определяется сложными процессами упругой и пластической деформации, которые, как правило, не поддаются анализу в замкнутой форме. Однако во время разгрузки давление уменьшается только за счет упругих процессов, и форма отпечатка изменяется, образуя изогнутую поверхность. При повторной нагружении это распределение давления должно быть восстановлено только с помощью упругих

процессов. Таким образом, *распределение давления* при максимальной нагрузке служит для связи упругопластических процессов во время начального нагружения с упругими процессами во время разгрузки и перегрузки. В этом контексте форма эффективного индентора должна быть такой, чтобы обеспечивает такое же распределение давления за счет упругой деформации плоского упругого полупространства. Для реализации этих идей, необходимо знание фактическом распределении давления. Конечно-элементное моделирование вдавливания конического индентора в упругопластические материалы показало, что в первом приближении давление распределено равномерно. Это происходит потому, что пластичность имеет тенденцию уменьшать влияние упругой особенности на кончике конуса и более равномерно распределять давление.

Очевидно, что вышеприведенные утверждения авторов [12] также подходят для внедрения пологих сферических инденторов. Учитывая предположения авторов [20, 30] о реальном распределении давления между равномерным и “герцевским”, будем искать реальное распределение давления в виде (9), где $\beta = 0...0.5$.

В классических монографиях по механике контактного взаимодействия и теории упругости [20, 31 и др.] рассмотрены только частные случаи напряженно-деформированного состояния для равномерного распределения давления ($\beta=0$) и для “герцевского” давления ($\beta=0.5$). Для $0 \leq \beta \leq 0.5$ аналитические выражения для инженерных расчетов напряженно-деформированного состояния при действии на полупространство нагрузки вида (9) получены авторами [32]. О достоверности приведенных в [32] общих решений для описания напряженно-деформированного состояния свидетельствует их совпадение с частными решениями, полученными в [20, 31], а также их использование при описании геометрии контакта в [33] с последующим сравнением с результатами конечно-элементного моделирования.

В связи с вышеизложенным предлагается следующая концептуальная модель процесса кинетического индентирования жесткой сферы. В процессе нагружения индентора в результате сложных процессов упругой и пластической деформаций формируется распределение давления в контакте индентора с материалом, которое определяется уравнением (8) кривой нагружения. При разгрузке индентора величина вертикальных и горизонтальных перемещений восстанавливаемой поверхности равна вертикальным и горизонтальным перемещениям восстанавливаемого упругого полупространства после действия на него искомого распределения давления [34]. При повторном нагружении индентора перемещения восстановленной поверхности будут эквивалентны соответствующим перемещениям упругого полупространства при действии на него искомого распределения давления.

Определение распределении давления на поверхности контакта. Впервые задача определения функции распределения контактных давлений поставлена в работе [35], в которой рассматривается внедрение жесткого шара в упругопластическое полупространство. При этом используется разработанный автором метод экспериментального теоретического равновесия. Одним из недостатков работы является то, что в ней не учитывались эффекты «pile-up/sink-in» (рис. 1), связанные с пластическим выдавливанием материала полупространства вокруг сферы (образование навала) и упругим продавливанием полупространства.

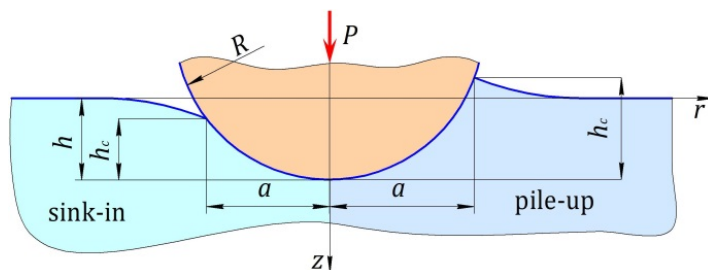


Рис.1. Эффекты «pile-up/sink-in» при внедрении сферического индентора

Рассмотрим этот вопрос более подробно. Пользуясь методикой [35], считаем что диаграмма вдавливания определена экспериментально и задана степенной функцией (8).

Условие равновесия

$$P = 2\pi \int_0^a p(r) r dr, \quad (16)$$

где $p(r)$ – функция распределения контактного давления.

Радиус площадки контакта для сферического индентора определяется выражением

$$a = \sqrt{2Rh_c - h_c^2}, \quad (17)$$

где h_c – глубина, на которой происходит контакт сферы с материалом полупространства. Рассмотрим вначале случай, когда $R \gg h_c$. В результате получим радиус контакта для параболоида второго порядка

$$a = \sqrt{2Rh_c}. \quad (18)$$

В работе [35] $a = \sqrt{2Rh}$.

Для функции контактных перемещений следует

$$u(r) = \frac{a^2 - r^2}{2R} = h_c - \frac{r^2}{2R} = c^p h - \frac{r^2}{2R}. \quad (19)$$

где $c^p = h_c/h_0$. При $c^p < 1$ имеет место эффект «sink-in», при $c^p > 1$ – эффект «pile-up».

Дифференцируя выражение (19) по r , имеем

$$\frac{du}{dr} = -\frac{r}{R}, \quad r dr = -R du. \quad (20)$$

Уравнение равновесия, выраженное через функцию контактных перемещений, имеет вид:

$$P = 2\pi R \int_0^{u_0} p(u) du. \quad (21)$$

где $u_0 = u(0) = h_c = c^p h$.

Функцию давления будем искать в виде степенной функции

$$p(u) = \xi u^\beta, \quad (22)$$

Где ξ, β – два параметра искомой функции давлений.

Подставляя (22) в (21) с учетом (8) имеем

$$C_l h^\alpha = 2\pi R \xi \frac{(c^p h)^{\beta+1}}{\beta+1}. \quad (23)$$

Полученное выражение может быть выполнено при условии

$$\alpha = \beta + 1, \quad \beta = \alpha - 1; \quad (24)$$

$$\xi = \frac{C_l (\beta + 1)}{2\pi R (c^p)^{\beta+1}} = \frac{C_l \alpha}{2\pi R (c^p)^\alpha}. \quad (25)$$

Подставляя (24) и (25) в (22) получим

$$p(u) = \frac{C_l \alpha}{2\pi R (c^p)^\alpha} u^{\alpha-1}, \quad (26)$$

а с учетом (19)

$$p(r) = p_0 (1 - r^2/a^2)^\beta, \quad (27)$$

где

$$p_0 = \frac{C_1 \alpha h^\beta}{2\pi R c^p} = \frac{C_1 h^\alpha (1+\beta)}{\pi 2 R c^p h} = \frac{P(1+\beta)}{\pi a^2} = p_m (1+\beta). \quad (28)$$

p_m – среднее давление на площадке контакта.

Так как α находится в пределах от 1 до 1.5, то $\beta = 0 \dots 0,5$.

Выражения (27) и (28) получены для параболического индентора, для которого радиус площадки контакта определяется выражением (18), или в безразмерном виде

$$\bar{a}_p = a_p / R = \sqrt{2\bar{h}_c}, \quad (29)$$

где $\bar{h}_c = h_c / R$.

Аналогично из выражения (17) для сферического индентора имеем

$$\bar{a}_s = \sqrt{2\bar{h}_c - \bar{h}_c^2} = \sqrt{2\bar{h}_c} \left(\sqrt{1 - \bar{h}_c/2} \right) = \bar{a}_p \sqrt{1 - \bar{a}_p^2/4}. \quad (30)$$

Если использовать решение (28) для сферического индентора, то следует учитывать, что для сохранения условия равновесия среднее давление на площадке контакта должно быть равным

$$p_m^s = p_m^p / (1 - \bar{a}_p^2/4). \quad (31)$$

Далее возможны два крайних варианта моделей распределения контактного давления:

а) максимальное давление в контакте изменяется аналогично выражению (31)

$$p_0^s = p_0^p / (1 - \bar{a}_p^2/4), \quad (32)$$

тогда

$$\beta_s = \beta_p = \alpha - 1; \quad (33)$$

б) максимальное давление в контакте $p_0^s = p_0^p$, тогда

$$1 + \beta_s = (1 + \beta_p) (1 - \bar{a}_p^2/4) = \alpha \cdot (1 - \bar{a}_p^2/4). \quad (34)$$

Первая модель распределения контактного давления является более простой и удобной к использованию, вторая модель еще более выравнивает давление, а с ростом значения $\bar{a}_p$ возможно отрицательное значение β_s . Для уточнения модели необходимы дополнительные исследования.

Заключение.

1. Показано, что использование теории Герца для описания процесса разгрузки сферического индентора является приближенным подходом, так как согласно теории Герца. контакт двух тел, изначально контактирующих в точке, сводится к контакту двух параболоидов второго порядка. Отсюда неявное предположение, что перед разгрузкой имеет место “герцевское” распределение давлений и что восстановленный профиль есть дуга окружности.

2. К такому же результату (контакту двух параболоидов второго порядка) приводит анализ Снеддона [5] для контакта двух сферических тел.

3. Предложена концептуальная модель процесса кинетического индентирования жесткой сферы, согласно которой в процессе нагружения сферы в результате сложных процессов упругой и пластической деформаций формируется распределение давления в контакте сферы с материалом, которое определяется уравнением кривой нагружения. При разгрузке сферы величина перемещений восстанавливаемой поверхности равна перемещениям восстанавливаемого упругого полупространства после действия на него искомого распределения давления. При повторном нагружении сферы перемещения восстановленной поверхности будут эквивалентны соответствующим перемещениям упругого полупространства при действии на него искомого распределения давления.

4. С использованием метода экспериментального теоретического равновесия [35] получены выражения (27) и (28) для распределения контактного давления при внедрении сферы в упругопластическое полупространство.

Литература:

1. Meyer E. Zeitschrift des Vereins Deutschen Ingenieure, 52 645-654 (1908)
2. Tabor D. The hardness of metals. Oxford: University press. Great Britain. 1951.
3. Rosenberg E. M. On the evaluation of the elastic modulus by the indentation method // Zh. Tekhn. Fiz. 1945. Vol. 15. N 3. P. 157 – 172
4. Galin L.A. Spatial contact problems of the theory of elasticity for punches of circular shape in planar projection // J. Appl. Math. Mech. (PMM), 1946. 10. P. 425-448.
5. Sneddon I.N. The relation between load and penetration in the axisymmetric Boussinesq problem for a punch of arbitrary profile, International journal of engineering science 3 (1965), No.1, pp. 47-57
6. Lukin V. V., Savitsky F. S. Evaluation of Young's modulus by indentation a spherical indenter. Research in the field of hardness measurement // Tr. Metrol. Inst. SSSR. 1967. N 91. P. 91 – 92
7. Bulychev S.I., Alekhin V.P., Shorshorov M.Kh., Ternovskii A.P., Shnyrev G.D. Determining Young's modulus from the indenter penetration diagram // Industrial Laboratory. 1975. 41. P. 1137.
8. Bulychev S.I., Alekhin V.P., Shorshorov M.K., Ternovskii A.P. Mechanical properties of materials studied from kinetic diagrams of load versus depth of impression during microimpression // Stren. Mater. 1976. V. 8. P. 1084.
9. Galanov B.A., Grigor'ev O.N., Mil'man Y.V., Ragozin I.P., Trefilov V.I. Determination of the hardness and Young's modulus with elastoplastic penetration of indentors into materials // Sov. Phys. Dokl. 1984. 29. P. 146-147.
10. Borodich F.M., Keer L.M. Contact problems and depth-sensing nanoindentation for frictionless and frictional boundary conditions // Int. J. Solids Struct. 2004. 41. P. 2479-2499.
11. Ogar P.M., Shilin V.A., Kazankina Ya.V. Refinement of the contact radius during kinetic indentation of the sphere // Sestems. Metods. Technologies. 2021. № 3 (51). P. 7-13.
12. Oliver W.C., Pharr G.M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology // Journal of Materials research society. 2004. V. 19. No. 1. P. 3-20.
13. Lee H., U.S. Patent No. 6,778,916 (17 Aug. 2004)
14. Lee H., Lee J.H., Pharr G.M. A numerical approach to spherical indentation techniques for material property evaluation // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2005. Vol. 53. P. 2037-2069.
15. Lee J.H., Kim T., Lee H. A study on robust indentation techniques to evaluate elastic-plastic properties of metals. Int.J. Solids and Structures 47 (2010) 647–664.
16. Hay J.L., Wolff P.J. Small correction required when applying the Hertzian contact model to instrumented indentation data. J. Mater. Res., Vol. 16, No. 5, May 2001. 1280-1286.
17. Collin J.-M., Mauvoisin G., El Abdi R. An experimental method to determine the contact radius changes during a spherical instrumented indentation // Mechanics of Materials 40 (2008) 401–406
18. Collin J.-M. Correction factor for contact radius in spherical indentation measurements // Mechanics of Materials 50 (2012) 47–52
19. Ogar P.M., Tarasov V.A., Gorokhov D.B. The correction factor in elastic modulus determining by indentation // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 887-888. pp 997-1000.
20. Johnson K. Contact mechanics. Moscow: Mir, 1989.
21. Aleksandrov V.M., Romalis B.L. Contact tasks in mechanical engineering. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 176 p.
22. Drozd M. S., Matlin M. M., Sidyakin Yu. I. Engineering calculations of elastic-plastic contact strain. — Moscow: Mashinostroenie, 1986. 244 p.
23. Matyunin V. M. Indentation as the materials mechanical properties diagnostics method. Moscow: Izd. MPEI, 2015. 288 p.
24. Matlin M. M., Mozgunova A. I., Kazankina E. N., Kazankin V. A. Methods of non-destructive evaluation of machines components strength characteristics. Moscow: Innovatsionnoe Mashinostroenie, 2019. 246 p.

25. Matyunin V.M., Marchenkov A.Yu., Abusaif N., Volkov P.V., Zhgut D.A. Regularities and properties of instrumented indentation diagrams obtained by ball-shaped indenter // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 5. С. 43-51.
26. Matyunin V.M., Marchenkov A.Yu., Abusaif N., Goryachkina M.V., Rodyakina R.V., Karimbekov M.A., Zhgut D.A. Evaluation of young's modulus of construction materials by instrumented indentation using a ball indenter // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 8. С. 64-68.
27. Zhang T., Wang S., Wang W. Method to determine the optimal constitutive model from spherical indentation tests // Results in Physics 8 (2018) 716–727.
28. Zhang T., Wang S., Wang W. Improved methods to determine the elastic modulus and area reduction rate in spherical indentation tests // Materials Testing. 60 (2018) 4. P. 355-362.
29. Argatov I.I., Dmitriev N.N, Fundamentals of the theory of elastic discrete contact. SPb.: Politehnika, 2003. 233 p.
30. Bulychov S. I., Alekhin V. P. Materials instrumented indentation test. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 224 p.
31. Timoshenko S.P., Goodyer J, Theory of Elasticity Moscow: Nauka, 1975. 576 p.
32. Ogar P., Gorokhov D., Mamaev L., Kushnarev V. Influence of the form of axisymmetric load on the stress-strain state of an elastoplastic half-space // MATEC Web of Conferences. 2019. 298. 00094
33. Ogar P., Gorokhov D., Zhuk A., Kushnarev V. Contact geometry during indentation of a sphere into an elastoplastic half-space // MATEC Web of Conferences. 2019. 298, 00093
34. Ogar P.M., Shilin V.A., Gorokhov D.B., Fedorov V.S. The effect of vertical and radial displacements on the parameters of the restored surface after the sphere is indented // AIP Conference Proceedings. 2022. (in print)
35. Kuzmenko A.G. Plastic contact of bodies of double curvature – a composition of methods: similarity; reduced radius of curvature; experimental-theoretical equilibrium // Problems of tribology.. 2009. №1. P.46-64

Distribution of contact pressure during the insertion of a spherical indenter into an elastoplastic half-space.

Kar'yalajnen N.V.^{1,a}, Obukhov Z.D.^{1,b}, Shilin V.A.^{1,c}

Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

^a alybeliw@mail.ru, ^b Obuxov.99@mail.ru, ^c wal-500@yandex.ru,

Keywords: spherical indenter, elastic-plastic half-space, contact pressure distribution, loading curve, unloading curve.

The rationale for the approach to determining the pressure distribution function on the contact surface when inserting a spherical indenter into an elastoplastic half-space is given. A conceptual model of the kinetic indentation of a sphere is proposed, according to which, during the loading of a sphere, as a result of elastic and plastic deformation processes, a pressure distribution is formed in the sphere's contact with the material, which is determined by the equation of the loading curve. When unloading the sphere, the amount of displacement of the surface to be restored is equal to the displacement of the elastic half-space to be restored after the desired pressure distribution is applied to it. Under repeated loading of the sphere, the displacements of the restored surface will be equivalent to the displacements of the elastic half-space under the action of the desired pressure distribution on it. Expressions are obtained for the distribution of contact pressure when a sphere is embedded in an elastoplastic half-space.

УДК 666.97.033

Анализ исследований в области изучения механизма разрушения твердых частиц

Зеньков С.А.^{1,а}, Дрюпин П.Ю.¹, Медведев С.Н.¹, Быков П.Д.¹,
Виноградов Е.Д.¹

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^аmf@brstu.ru

Ключевые слова: разрушение твердых частиц, коэффициент пропорциональности, показатель степени измельчения.

В данной работе проведен анализ существующих исследований в области изучения механизма разрушения твердых частиц применительно к дорожно-строительным материалам. Установлено, что определенные на основании испытаний существующего помольного оборудования значения коэффициента K и показателя степени измельчения n способны характеризовать любую стадию дробления и измельчения материалов.

При разрушении материалов наиболее распространены механические способы воздействия на материал, так как с помощью их можно обеспечить необходимую крупность готового продукта и его форму. Поэтому механические способы отличаются своим многообразием и сочетанием способов разрушения. Это в свою очередь привело к многообразию конструкций измельчительного оборудования, которые, собственно, и отражают механические способы разрушения частиц материала [2, 11]. Последовательно можно проследить использование того или иного способа в каждом измельчительном оборудовании. Наиболее часто пользуются сочетанием способов разрушения в одном измельчительном оборудовании. В конусной дробилке осуществляется раздавливание материала с истиранием о боковые поверхности конусов, в шаровой мельнице удар с истиранием [2,4].

Частицы материала разрушаются в результате перехода внешних усилий за пределы прочности (предел временного сопротивления) материала. Широко используются способы измельчения, основанные на образовании в частицах остаточной деформации путем [2] раздавливания, когда разрушение происходит вследствие перехода напряжений за пределы прочности материала на сжатие; раскалывания при переходе напряжений за пределы прочности материала на растяжение; излома при переходе напряжений за пределы прочности материала на изгиб; среза в сочетании с изломом при переходе за пределы прочности материала на изгиб и сдвиг; истирания при переходе касательных напряжений за пределы прочности на сдвиг; удара или динамического воздействия, при этом разновидности упругих деформации здесь остаются теми же (сжатие, растяжение, изгиб, сдвиг) и разрушение происходит при переходе напряжений за пределы прочности материала на сжатие, растяжение, изгиб и сдвиг.

Большинство исследователей в области измельчения материалов [4] принимают, что раскалывание, излом и сдвиг в сочетании с изломом имеют одинаковую природу при этом относительная прочность пород на сдвиг и изгиб имеет одинаковый порядок (см. табл. 1) и для упрощения исследований понимают под перечисленными способами один - раскалывание. Таким образом, принято рассматривать четыре основных способа механического воздействия на материал: раздавливание, раскалывание, истирание и удар.

Способ разрушения выбирается в зависимости от физико-механических свойств измельчаемого материала и от крупности его частиц. Различают твердые (прочные)

материалы и менее твердые, мягкие, вязкие и хрупкие. Способность материала к измельчению [2, 3] может быть определена как реакция материала на механические воздействия. Способность противостоять разрушению зависит также от наличия трещин в частицах материала, от структуры материала и формы частиц. Трещиноватость уменьшает сопротивление частиц разрушению. Наибольшее сопротивление оказывают материалы раздавливанию и истиранию, меньшее - изгибу и наименьшее растяжению (см. табл. 1).

Таблица 1

Относительная прочность пород при различных видах напряжений в %%

	Сжатие	Сдвиг	Изгиб	Растяжение
Граниты	100	9	8	2–4
Песчаники	100	10–12	6–20	2–5
Известняки	100	15	8–10	4–10

Необходимые для разрушения частиц материала усилия развиваются в оборудовании, конструкция которого обеспечивает осуществление определенного способа разрушения. В условиях непрерывного процесса, вследствие неупорядоченности частиц в рабочем пространстве измельчителя наблюдаются все указанные способы разрушения, но всегда превалирует тот способ, для осуществления которого предназначено данное оборудование.

В современной практике, на основании требуемого конструктивного исполнения оборудования, а также в целях предотвращения излишнего измельчения материала, применяется оборудование, реализующее главным образом способы раздавливания и удара при дополнительных истирающих и изгибающих воздействиях на измельчаемый материал [1,2].

Крупное, среднее и мелкое дробление твердых (прочных) и хрупких материалов целесообразно производить раздавливанием [2]. Твердые и вязкие материалы выгоднее подвергать измельчению раздавливанием и истиранием. Крупное дробление мягких и хрупких материалов целесообразно производить раскалыванием (излом, срез), а среднее и мелкое - ударом. Среднее и мелкое измельчение производят ударом с истирающими и изгибающими воздействиями. Тонкое измельчение производят путем удара с последующим истиранием. Сверхтонкое измельчение за счет высокоскоростного удара с истиранием [3].

Определенному размеру частиц исходного и конечного материала соответствует стадия дробления или измельчения. Пределы прочности частиц, которые получены в результате дробления, значительно ниже пределов прочности частиц, которые получены путем тонкого измельчения (см. табл. 2). Поэтому можно отметить, что предел прочности материала не является физической константой и может изменяться в интервале 3-4 порядков [1] в зависимости от конструкции, размеров и других показателей помольного оборудования и способов механического разрушения, реализованных в этом оборудовании.

Таблица 2

Распределение прочностей измельчаемого материала

Номер стадии	Наименование стадии	Степень измельчения i	Относительная прочность %
1	Грубое дробление	0–1	1
2	Дробление	1–10	0,1
3	Измельчение	10–100	0,01
4	Тонкое измельчение	100–1000	0,001
5	Сверхтонкое измельчение	1000	0,001

На основании таблицы 1 и таблицы 2 можно предположить, что конструкция помольного оборудования, в котором будут доминировать изгибающие и растягивающие воздействия, обеспечит измельчение (дробление) материала с меньшими энергетическими

затратами по сравнению с конструкцией, реализующей, например, способы раздавливания и истирания при одинаковых размерах исходного и конечного материала.

На основании таблицы 2 изменение предела прочности материала в зависимости от степени измельчения (дробления), а равно как и от способов разрушения, исключает возможность существования законов измельчения, в которых указывается на постоянство предела прочности материала [1,5].

Многие исследователи А. Таггарт, А. Гриффитс, Ф. Бонд, Е. Рей, Л. Нитер [6,7] дали свои варианты описания механизмов разрушения твердых частиц. В процессе изучения явлений дробления совершенствовались методы анализа механизма разрушения и способы измерения разрушающих силовых факторов. Теоретической основой изучения механизма разрушения явился известный в механике принцип минимальной энергии, по которому равновесное состояние деформированного тела соответствует минимуму потенциальной энергии системы. Это положение было рассмотрено в 1921 году А. Гриффитсом и развито рядом других исследователей [11].

Каждой частице материала присуща форма с выступающими частями. При приложении усилия сжатия выступающие части А частицы (рис. 1) первыми воспринимают предельные нагрузки. С нарастанием усилий выступающие части дробятся на мелкие частицы, образуя конус разрушения и новую поверхность на теле частицы, с помощью которых обеспечивается устойчивое положение частицы относительно рабочего органа и вероятность захвата ее рабочим органом для дальнейшего разрушения. Усилия сжатия продолжают расти, частица, с обнаженными поверхностями сжимается, при ударе возможно образование одной поверхности от воздействия рабочего органа, деформируется и в ней возникают напряжения. При сжатии в толще частицы из микродефектов в результате возникновения поперечных растягивающих напряжений, создающих предельные нагрузки, образуется трещина, размеры которой с течением времени увеличиваются. Рост усилий сжатия и вновь образованная поверхность приводит к концентрации напряжений и в других местах, что сопровождается появлением дополнительных трещин. Наиболее благоприятные условия для образования трещин создаются в поверхностных слоях в местах соприкосновения разрушаемой частицы с рабочим органом, т.е. на вновь образованной поверхности, где возникают наибольшие напряжения.

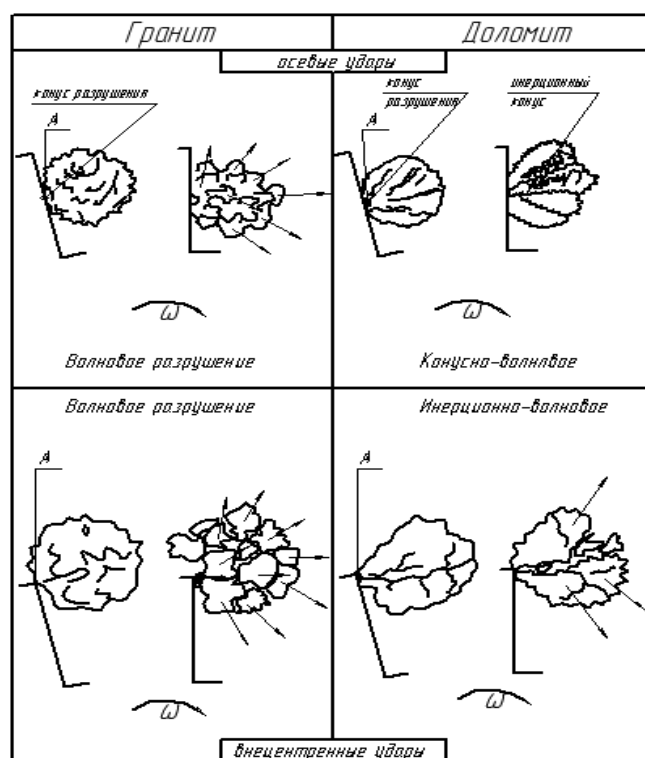


Рис. 1. Механизм разрушения твердых тел в дробилке

На вновь образованной поверхности, полученной в результате воздействия рабочего органа сосредотачивается основное число трещин, причем по вновь образованным поверхностям происходит ориентация частицы относительно рабочего органа дробилки и взаимодействующих с ней частиц.

Предел упругости хрупкого материала находится в практически равном соотношении с пределом его прочности и до образования первой трещины энергия удара, разрушающая частицу, накапливается в виде энергии упругих напряжений. В некоторых измельчительных устройствах сила воздействия прилагается мгновенно и трещина возникает до того, как в частице установится равновесное распределение энергии. Тогда для разрушения частицы требуется - меньшее количество энергии. Энергия, образовавшая первую трещину, которая как правило направлена вдоль поверхности срастания кристаллов, будет являться энергией, затрачиваемой на измельчение. А работа, затрачиваемая на измельчение частицы пропорциональна работе по образованию первой трещины [7].

Эта пропорциональность экспериментально доказана Л. Питером, который, исследуя механизм разрушения твердых частиц, проводил динамические испытания кварца. Первые удары шара разрушают большое число кварца, при последующих ударах количество частиц уменьшается, т.к. энергии разрушения недостаточно для достижения критической величины напряжений, в последующих ударах энергия теряется без образования поверхности.

По теории разрушения твердых тел Каре и Стерманда энергия, не образовавшая новую поверхность, распределяется на поверхностном слое частицы и преобразуется в тепло. Это теоретически подтверждается в том случае, когда разрушающее усилие действует в поперечном направлении относительно слоя частицы или поверхности срастания кристаллов, энергия концентрируется вблизи точек контакта. После разрушения частицы энергия высвобождается в виде тепла.

При незначительном количестве, а у небольших частиц материала отсутствия трещин измельчение становится очень трудоемко. В этом случае для разрушения материала необходимо преодолеть молекулярное притяжение, имеющее величину порядка 103 - 154 МПа.

Однако частицу материала нельзя разрушить до бесконечно малой величины. Существует минимальный размер, начиная, с которого нельзя больше ожидать эффекта измельчения даже при сравнительно больших затратах энергии [11,12].

Кроме вновь образованной поверхности, которую принимают основной в механизме разрушения твердых частиц, необходимо также принимать во внимание размер измельчаемой частицы. Обычно упрощают форму частицы до сферической в виду ее малости. Разрушающее усилие возрастает с уменьшением размера частицы в силу снижения вероятности неоднородностей и количества трещинообразований на поверхности частицы.

Таким образом, разрушение частицы происходит в две фазы. В первой возникает упругая деформация и образование контактных зон. Во второй - разрушение этой частицы материала. На расход энергии при разрушении значительно влияет крупность исходного материала и проявление пластических деформаций. Минимум затрат обеспечивается, когда упругая деформация, предельная для зерна заданного минимального размера, распространяется со скоростью превышающей скорость образования отдельных трещин в объеме разрушаемой частицы, до момента массового образования трещин в элементарных объемах равным объемам частиц заданной крупности, т.е. при высоких скоростях нагружения.

Между механизмом разрушения частиц и затрачиваемой при этом энергии существует тесная связь. Минимум энергии указывает на правильность выбранных способов разрушения применительно к данному материалу и протекающего при этом механизма разрушения в помольном оборудовании. Основной задачей при дроблении и измельчении материалов является установление связи между затрачиваемой энергией и характеристиками крупности материала.

Впервые в 1857 году Н. Риттингером была сформулирована связь между количеством затрачиваемой энергии и характеристиками дисперсности материала до и после измельчения. Согласно этой гипотезе, полезная работа измельчения пропорциональна вновь образованной поверхности частиц материала.

В математическом виде полезная работа A_3 выразится как:

$$A_3 = K_p \cdot S, \quad (1.1)$$

где K_p – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность работы, Вт/см²;
 S – вновь образованная поверхность, см².

Однако, исследуя возможности применения теории Риттингера, были приведены доказательства того, что в шаровых мельницах удельная работа возрастает пропорционально квадрату удельной поверхности. Доказательства основываются на экспериментах и сводятся к следующим [8]:

удельная поверхность изменяется линейно по отношению к моменту вращения шаровой мельницы;

удельная поверхность изменяется линейно с продолжительностью измельчения.

В процессе измельчения присутствует совокупность момента вращения и продолжительности измельчения и потому, предполагается, что работа пропорциональна квадрату удельной поверхности [8].

Нельзя согласиться с этим доказательством потому, что существует предел размалываемости материала, который накладывает ограничения при образовании поверхности, т.е. по истечении некоторого времени образования удельной поверхности не произойдет или произойдет, но не в значительной мере, а, следовательно, квадратичной пропорциональности не будет [8].

Основываясь на механизме разрушения твердых частиц можно предположить, что зависимость Риттингера не принимает во внимание упругие предельные объемные напряжения. Зависимость справедлива том случае, когда размер измельчаемых частиц обеспечивает одинаковые по величине вновь образованные поверхности первой фазы разрушения, когда происходит разрушение выступающих частей частицы, и второй фазы, когда после разрушения образуется поверхность, природа которой обусловлена расположением микродефектов и трещинообразований в частице.

Предположение об эффективности теоретической зависимости Риттингера справедливо только в определенном интервале частиц материала. Если суммарная вновь образованная поверхность первой фазы разрушения пропорциональна вновь образованной поверхности второй фазы, то только зависимость Риттингера воспроизведет связь между затрачиваемой энергией и характеристиками дисперсности материала.

В 1874 г. В. Л. Кирпичев, а позднее в 1885 Ф. Кикк предложили гипотезу, что энергия, требуемая для производства аналогичных изменений в очертании геометрически подобных тел одинакового технологического состава, изменяется пропорционально объемам или массам этих тел, т.е. расход энергии на измельчение данного материала при прочих разных условиях прямо пропорционален объему или массе:

$$A_K = K_K \cdot V, \quad (1.2)$$

где K_K – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность работы, Вт/с³;

V – объем измельчаемого материала.

Гипотеза основана на представлении, что дробимые частицы разных размеров геометрически подобны и имеют одинаковый технологический состав. Для горных пород эта теория мало применима из-за гетерогенности пород, происходящей от неравномерного распределения составляющих минералов и первоначальных размеров частиц, которая в свою очередь приводит к неравномерному распределению прочностей и напряжений.

Разнородность измельчаемого материала усиливается анизотропностью, происходящей от неравномерного распределения неоднородностей по различным направлениям [2, 8].

При использовании теории Кирпичева-Кикка [2] необходимо учитывать, что она воспроизводит только работу упругих деформаций, т.е. работу, необходимую для первой фазы механизма разрушения частиц. В ней не учитывается процесс образования новой поверхности. В области отрыва объем частиц велик, а вновь образованная зона мала. Тогда как в контактных зонах, как уже отмечалось, при малом объеме раздробленных частиц получаемся большая новая поверхность и увеличивается степень измельчения. Энергоемкость в контактной зоне значительно больше энергоемкости в зоне объемного разрыва.

Полная работа по разрушению частицы материала равна сумме работ, расходуемых на деформацию тела и на образование новых поверхностей. Формула предложена П. А. Ребиндером:

$$A = A_K + A_S = K \cdot \Delta V + K_p \cdot S, \quad (1.3)$$

где K – коэффициент пропорциональности, Вт/см².

При измельчении крупных частиц с малой степенью измельчения $i = \frac{D}{d} = 4 \dots 8$, где D и d – средний размер исходного и конечного продукта измельчения, величина вновь образованной поверхности незначительна, поэтому считают, что $K_p \cdot S \rightarrow 0$. Деформированная часть объема ΔV пропорциональна объему V измельчаемого материала:

$$A = K \cdot \Delta V, \quad (1.4)$$

где $\Delta V = K_1 \cdot V$ – деформированная часть объема;

K_1 – коэффициент пропорциональности деформированной части объема.

Тогда выражение работы при разрушении крупных частиц:

$$A = K \cdot K_1 \cdot V = K_K \cdot V \quad (1.5)$$

Формула известна как выражение работы по Кирпичеву–Кикку.

Если разрушению подвергается частица с небольшим объемом тела и степенью измельчения $i=100 \dots 200$, то после разрушения получается продукт с большей величиной образованной поверхности, чем величина поверхностей, образованных в контактных зонах.

Тогда при определении работы разрушения пренебрегают работой, расходуемой на деформацию тела, $K \Delta V \rightarrow 0$ т.е. и полная работа будет:

$$A = K_p \cdot S, \quad (1.6)$$

Выражение работы известно как зависимость Риттингера.

Многие исследователи [8] представляют дробление отдельного куска материала с такими степенями дробления, когда следует при определении работы учитывать оба слагаемых,

Дальнейшие исследования по измельчению показали, что работа измельчения пропорциональна как вновь образованной поверхности, так и объему измельчаемого материала [9].

В 1951 году Ф. Бонд предложил определять работу, затрачиваемую на измельчение, как величину, пропорциональную среднегеометрической из объема и поверхности разрушаемой частицы:

$$A = K \cdot \sqrt{V \cdot F}$$

Здесь принимается $V = K_1 \cdot D^3$ – объем деформируемой частицы; $F = K_2 \cdot D^2$ – вновь образованная поверхность, и тогда:

$$A = K \cdot \sqrt{K_1 \cdot K_2} \cdot \sqrt{D^5} = K_O \cdot D^{2,5}, \quad (1.7)$$

где $K_O = K \cdot \sqrt{K_1 \cdot K_2}$ – коэффициент пропорциональности.

Позднее А. К. Рундквист описал работу как:

$$A = K_O \cdot D^n \quad (1.8)$$

где K_O – коэффициент пропорциональности;

D – средний размер измельчаемого материала;

n – показатель степени, который может изменяться от 2 до 3 в зависимости от способа разрушения, размеров частицы, степени измельчения, физико-механических свойств измельчаемого материала, характера приложения разрушающих факторов.

Формулы (1.1, 1.2, 1.7), которые известны в литературе как теоретические законы измельчения и на которых основываются все другие перечисленные, не используются для количественных расчетов, когда требуется определить абсолютное значение работы.

Только внешне процесс измельчения кажется простым. В действительности же с учетом характера, величины и направления сил, под действием которых материал разрушается, а также количественных результатов разрушения он является в высшей степени сложным, и стремление описать его каким-либо обобщенным уравнением едва ли может привести к исчерпывающему ответу на основной вопрос теории измельчения [9].

Следует отметить, что предложенные гипотезы содержат в себе очень важные коэффициенты пропорциональности K (K , K_K , K_L , K_O), определение которых вызывает существенные трудности для данного материала, кроме того, они скрыто содержат в себе уже затраченную на измельчение работу. Примером может служить показатель измельчаемости ω_i Ф. Бонда, который не только содержит затраты энергии, но и косвенно влияет на производительность измельчительного оборудования [8]. Знаменатель размерности показателя ω_i косвенно содержит размерность производительности.

Литература:

1. Акунов В. И. Анализ современной помольной техники и динамика ее развития. – Рукопись депон. во ВНИИСМе Минпромстройматериалов СССР, М., 1984–230с.
2. Андреев С. Е., Перова В. А., Зверевич В. В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М: Недра, 1990. – 301с.
3. Олевский В. А. Размольное оборудование обогатительных фабрик. – М.: Госгортехиздат, 1963. – 448с.
4. Добронравов С.С., Добронравов М.С. Строительные машины и оборудование: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2006. – 445 с.
5. Leskin A.D. Osnovnye zakonomernosti izmel'cheniia materialov [The main regularities of grinding materials]. Moscow, VNIOSM, Sovremennoe izmel'chitel'noe oborudovanie: Obz. inf. -Vyp. 3, seriia 7. Promyshlennost' nerudnykh i nemetallorudnykh materialov, 2008, pp. 2-14.
6. Bond F. C. Standurd gruidability tests tabulated. Traus. AIM. ME. 1949.

7. Taggart A. F. Hand book of miucral dressing, 1945.
8. Гийо Р. Проблема измельчения и ее развитие.– М.: Стройиздат, 1964.– 112с.
9. Сиденко П. М. Измельчение в химической промышленности.– М.: Химия, 1977.– 368с.
10. Баловнев В.И., Бакатин Ю.П., Зеньков С.А., Журавчук С.В. Сдвиговой стенд // Авторское свидетельство SU 1310696 A1, 15.05.1987. Заявка № 3992052 от 12.12.1985.
11. Ходаков Г. С. Физика измельчения.– М.: Наука, 1972.– 307с.
12. Zenkov S.A., Kirichenko O.P., Mineev D.A. Reducing adhesion of soil to the earth-moving machines using piezoceramic transducers // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2017. № 4. С. 56-58.

Analysis of research in the field of studying the mechanism of destruction of solid particles

Zenkov S.A.^{1,a}, Dryupin P.Yu.¹, Medvedev S.N.¹, Bykov P.D.¹,
Vinogradov E.D.¹

¹Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, Russian Federation

^amf@brstu.ru

Keywords: destruction of solid particles, the proportionality coefficient, the degree of grinding.

In this paper, an analysis of existing studies in the study of the mechanism of destruction of solid particles in relation to road-building materials is carried out. It is established that the values of the coefficient K and the index of grinding degree n , determined on the basis of tests of existing grinding equipment, are capable of characterizing any stage of crushing and grinding of materials.

Эксплуатация и ремонт машин и оборудования

Чебан А.Ю. Оборудование для глубокоселективной выемки ценного минерального сырья с сохранением его природного качества	4
Чебан А.Ю. Модернизированный карьерный комбайн с комбинированным оборудованием для разработки сложноструктурных месторождений	8
Ващишина А. П. , Ващишин С. П., Злыднев В. Д. Проблемы эксплуатации и неисправности вала ротора турбины: причины и методы устранения	12
Шаура А.С., Федоров В.С., Портнягина А.В. Физические процессы влияния магнитной активации на этапы приготовления цементного теста в бетоносмесительных установках	16
Гулий И.Е., Панченко Д.Р., Осипов М.С., Тимофеев Е.Д., Погонина А.М. Определение параметров сборной модели отвала бульдозера	22
Дробит А.А., Герасимов С.Н. Актуальность информационных технологий при обработке бетонных поверхностей	27
Архипов А.Б. Сравнительный анализ техники, применяемой при разработке месторождений открытым способом	32
Востоков Н.В., Кашиба В.Б., Мамаев Л.А. Поворотный ленточно-валковый рабочий орган бетоноотделочной машины	37
Запутляев К.Н., Боярский А.В., Погонина А.М. Определение параметров поворотного рабочего оборудования экскаватора	41
Федоров В.С. , Нестер А.С., Портнягина А.В. Магнитная активация бетона и её роль в 3D-печати строительных конструкций	45
Федоров В.С., Нестер А.С. Аддитивные технологии в строительстве, тенденции развития и прогнозирование роста рынка 3D-печати	49
Федоров В.С., Пугачёв А.А., Герасимов С.Н. Бестраншейные технологии укладки подземных коммуникаций: эволюция методов и бионические инновации	53
Мамаев Л.А., Федоров В.С., Новиков Е.В., Кузук А.С., Залетаева Е.И. Коэффициент трения бетонных смесей по металлическим поверхностям: комплексный анализ факторов, методов и практических приложений	57
Матвиенко С.А., Савенко Э.С., Жданова Л.Ф. Методология системного подхода управлением системой фирменного сервиса легковых автомобилей	61
Зеньков С.А., Минеев Д.А., Дрюпин П.Ю., Бондалет И.С., Быков П.Д. Перспективы применения пьезокерамических излучателей для снижения адгезии грунтов	65
Кабутков К.Ю., Лодатко А.Ю., Безродных О.И., Зинчук Н.А., Виноградов Е.Д. Определение показателя степени измельчения помольного оборудования	69
Зеньков С.А., Дрюпин П.Ю., Бондалет И.С., Минеев Д.А., Медведев С.Н. Стенды для сдвига грунтов по различным поверхностям	74
Портнягина О.Б., Портнягина А.В. Влияние типа смесителя на эффективность распределения добавок в бетоне	80
Жмуров В.В., Кобзов А.Ю., Жук Е.А. Искусственный интеллект и машинное обучение в управлении строительной техникой	85
Жмуров В.В., Герасимов С.В., Кобзов А.Ю., Сеницын С.А., Жук Е.А., Томилов С.А., Брагин С.Н., Аскеров Р.Т. Возможные пути модернизации гидросистем с длинноходовыми гидроцилиндрами	89
Герасимов С.В., Кобзов А.Ю., Сеницын С.А., Жук Е.А., Томилов С.А. Стенд для диагностирования гидроцилиндров	97

Востоков Н.В., Кашуба В.Б., Мамаев Л.А. Обработка незатвердевших бетонных поверхностей поворотным ленточно-валковым рабочим органом бетоноотделочной машины.	101
Портнягина А.В., Занозовский А.И., Сияннин Н.В. Определение заглаживающей способности дискового рабочего органа с дополнительным круговым движением	106

Современные технологии и автоматизация в машиностроении

Малинин П.В., Бочкарев П.Ю. Оценка выполнения условия силового замыкания при наладке операций проходного бесцентрового шлифования	112
Бурдо Г.Б., Тарасов П.О. Особенности подготовки технического задания в системе управления качеством на этапе конструкторской подготовки производства	116
Попов В.Ю., Казаков Е.Г., Абрамович О.П., Зикирлов У.Ш., Ревенко Н.И. Актуальность мировых машиностроительных трендов в 2025 году	122
Попов В.Ю., Казаков Е.Г., Абрамович О.П., Зикирлов У.Ш., Ревенко Н.И. Аналитический обзор современных производителей металлорежущих материалов и инструментов	129
Левко В. А., Теряев Н. С., Литовка О. В., Иванов П. А., Рыков А. Д. Применение цифровых двойников при создании элементов технологической оснастки для обработки абразивным потоком	134
Литовка О. В., Левко В.А., Иванов П. А. Повышение производительности обработки абразивным потоком образцов из порошкового молибдена за счет использования рабочей среды нового состава	138
Сысоева Л. П., Левко В. А., Иванов П. А. Разработка рекомендаций по отделочно-упрочняющей обработке крыльчаток из алюминиевых сплавов на основе анализа современного уровня обработки абразивным потоком	143
Рожкова Е.А., Кустов А.В. Разработка системы автоматизированного контроля процесса развертывания крупногабаритных солнечных батарей на базе микроконтроллеров	150
Ерошков В.Ю., Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Перспективные технологические решения и современное оборудование в области автоматизации сборки силовых агрегатов с многосвязными трансмиссионными связями и редукторными передачами	156
Назарьев А.В., Бочкарёв П.Ю. Перспективы применения методики выявления критичных требований к сборке высокоточных изделий для оценки технологичности конструкции	163
Евтюхина К.В., Архипов П.В., Риттер Р.А., Шалетов Е.П., Туров З.И. Анализ влияния аэродинамических и конструктивных характеристик ветроэнергетических установок на их эффективность	168
Архипов П.В., Николаев В.А., Тимофеев И.Т., Синебрюхов С.А., Туров З.И. Модернизация коробки скоростей фрезерного станка	172
Архипов П.В., Евтюхина К.В., Синебрюхов С.А., Шалетов Е.П., Риттер Р.А. Анализ влияния шероховатости поверхности кулачковых валов на их износостойкость и долговечность	178

Конструкции, технические и эксплуатационные свойства транспортных средств

<i>Аветисян А.С.</i> Комбинированная энергетика: разработка и внедрение	184
<i>Семыкина А.С., Сердюк Д.А., Артыков М., Цой Е.А., Петрук М.В.</i> Повышение безопасности дорожного движения	188
<i>Семыкина А.С., Сердюк Д.А., Артыков М., Цой Е.А., Петрук М.В.</i> Развитие организации дорожного движения	192
<i>Семыкина А.С., Омельченко Г.Д., Артыков М., Цой Е.А., Андреева С.О.</i> Целесообразность проведения технического обслуживания автомобилей	196
<i>Орехов В.В.</i> Исследования физико-механических параметров трансмиссионного смазочного материала гидромеханических коробок передач автобусов в процессе эксплуатации	200
<i>Лукашова Е.В.</i> Оценка жесткостных свойств кузова пассажирского вагона на основе усовершенствованной методики	206
<i>Рыков С.П., Тобоков Р.В.</i> Алгоритм решения системы уравнений, описывающих колебания безрессорной подвески с возможностью отрыва шины от опорной поверхности дороги	212

Материаловедение, динамика и прочность машин и механизмов

<i>Белоголов Ю.И.</i> Совершенствование конструкции вторичных уплотнений в разгруженных соединениях	220
<i>Попов А.М., Мехдиев Р.В.О.</i> Влияние геометрических параметров прямозубых передач на долговечность	225
<i>Горунович С.Б.</i> Краткий анализ применимости современных экзоскелетных технологий в промышленности	229
<i>Гиннэ С.В.</i> К вопросу о методах производства аморфных металлических материалов	244
<i>Рожкова Е.А., Кустов А.В.</i> Расчет надежности платформы «Экспресс-1000»	251
<i>Рожкова Е.А., Кустов А.В.</i> Применение композиционных материалов с памятью формы в приводах развертывания космических конструкций	259
<i>Стручков А.В.</i> Совершенствование лабораторного стенда для исследования напряженного резьбового соединения при одновременном действии силы затяжки и внешней осевой нагрузки	265
<i>Ващишин С. П., Ващишина А. П.</i> Эксплуатационные свойства пластичных смазочных материалов и моторных масел	271
<i>Шалыгин М.Г., Евтух Г.Е.</i> Технология нанесения графенового покрытия на металлическую поверхность методом термодиффузии	276
<i>Евтух Е.С., Евтух Г.Е.</i> Повышение износостойкости металлических поверхностей нанесением покрытия на основе графена	280
<i>Кривлёва В. А., Кустов А. В.</i> Сравнение механических свойств полимерных матриц в зависимости от концентрации пластификатора	285
<i>Кривлёва В. А., Кустов А. В.</i> Исследование свойств композиционного материала с борными волокнами	288
<i>Зырянов Е. Ю., Кустов А. В.</i> Исследование механических свойств стеклопластиковых композиционных материалов, полученных методом контактного формования	292

Зырянов Е. Ю., Кустов А. В. Исследование свойств композиционных материалов из стеклопластика, полученных методом вакуумной инфузии	297
Веремейчик А.И., Холодарь Б.Г. Исследование температурного поля при лазерном упрочнении сталей	301
Кушнарев В.С. Сравнение методов аппроксимации функционала проницаемости для упругого контакта шероховатых поверхностей	309
Веремейчик А.И., Холодарь Б.Г. О тепловых импульсах при действии движущегося локального источника нагрева	313
Мбида Номо Виктор, Штефан Ю. В. Методы исследования износостойкости деталей дробильного оборудования в лабораторных условиях	319
Мбида Номо Виктор, Штефан Ю.В. Технологические способы повышения износостойкости деталей дробильного оборудования	325
Кожевников А.С., Маргарян Д.Э., Сангзода А.С. Плотность зазоров при контактировании шероховатой поверхности с упругим полупространством	329
Карьялайнен Н.В., Обухов З.Д., Шилин В.А. Распределение контактного давления при внедрении сферического индентора в упругопластическое полупространство	333
Зеньков С.А., Дрюпин П.Ю., Медведев С.Н., Быков П.Д., Виноградов Е.Д. Анализ исследований в области изучения механизма разрушения твердых частиц	342

Опубликовано в авторской редакции

Подписано в печать 15.04.2025

Формат 84×108 1/16

Печать трафаретная

Уч.-изд.л 28,75 Усл.печ.л. 28,75.

Заказ 30

Электронная версия издания размещена

в локальной сети ФГБОУ ВО «БрГУ» в разделе «Библиотека»

Отпечатано в издательстве ФГБОУ ВО «БрГУ»

665709, г. Братск Иркутской области, ул. Макаренко 40

