

ТРАНСПОРТНОЕ НАУЧНО – ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ МАШИНОСТРОЕНИЕ

С 2004 г. по 2021 г. – журнал «Вестник Брянского
государственного технического университета»;
С 2022 г. – журнал «Транспортное машиностроение»

№ 7(43)
2025

ISSN: 2782-5957

DOI: 10.30987/2782-5957-2025-7

Журнал выходит ежемесячно

Председатель редакционного совета – Федонин О.Н., д-р техн. наук, проф.

Заместитель председателя редакционного совета – Нагоркин М.Н., д-р техн. наук, доц.

Редакционный совет:

Агеев Е.В., д-р техн. наук, проф., (Курск)

Агуреев И.Е., д-р техн. наук, проф., (Тула)

Албагачиев А.Ю., д-р техн. наук, проф., (Москва)

Антипин Д.Я., канд. техн. наук, доц., (Брянск)

Анцев В.Ю., д-р техн. наук, проф., (Тула)

Безъязычный В.Ф., д-р техн. наук, проф., (Рыбинск)

Бишутин С.Г., д-р техн. наук, проф., (Брянск)

Буяновский И.А., д-р техн. наук, (Москва)

Вайнер Л.Г., д-р техн. наук, проф., (Хабаровск)

Волохов Г.М., д-р техн. наук, проф., (Коломна)

Горленко А.О., д-р техн. наук, проф., (Брянск)

Дорохин С.В., д-р техн. наук, доц., (Воронеж)

Ивахненко А.Г., д-р техн. наук, проф., (Курск)

Киричек А.В., д-р техн. наук, проф., (Брянск)

Космодамианский А.С., д-р техн. наук, проф., (Москва)

Куц В.В., д-р техн. наук, проф., (Курск)

Макаренко К.В., д-р техн. наук, проф., (Брянск)

Макаров В.Ф., д-р техн. наук, проф., (Пермь)

Мокрицкий Б.Я., д-р техн. наук, проф., (Комсомольск-на-Амуре)

Петрешин Д.И., д-р техн. наук, доц., (Брянск)

Подмастерьев К.В., д-р техн. наук, проф., (Орел)

Пугачев А.А., д-р техн. наук, доц., (Брянск)

Рассоха В.И., д-р техн. наук, доц., (Оренбург)

Савин Л.А., д-р техн. наук, проф., (Орел)

Смоленцев В.П., д-р техн. наук, проф., (Воронеж)

Соловьев Д.Л., д-р техн. наук, проф., (Муром)

Степанов Ю.С., д-р техн. наук, проф., (Орел)

Суслов А.Г., д-р техн. наук, проф., (Брянск)

Трушников Д.Н., д-р техн. наук, (Пермь)

Туричин Г.А., д-р техн. наук, проф., (Санкт-Петербург)

Хейфец М.Л., д-р техн. наук, проф., (Минск, Беларусь)

Химухин С.Н., д-р техн. наук, проф., (Хабаровск)

Шалыгин М.Г., д-р техн. наук, доц., (Брянск)

Шантаренко С.Г., д-р техн. наук, доц., (Омск)

Янюшкин А.С., д-р техн. наук, проф., (Чебоксары)

Редколлегия:

Главный редактор – Хандожко А.В., д-р техн. наук, проф.

Зам. главного редактора – Антипин Д.Я., канд. техн. наук

Зам. главного редактора – Съянов С.Ю., канд. техн. наук

Отв. секретарь – Татаринцев В.А., канд. техн. наук

Редактор – Лакалина Н.Ю.

Ведущий инженер – Ерохина В.А.

Адрес редакции:

241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

Телефон: +7 (4832) 58-82-77

Сайт: tu-bryansk.ru/info/zhurnaly

E-mail: trans-eng@tu-bryansk.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Серия ПИ № ФС77-75522 от 12 апреля 2019 года

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении или непосредственно в редакции журнала. Подписной индекс по интернет-каталогу "Пресса по подписке": Э80859.

Журнал включен в специализированный библиографический сервис CrossRef

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (категория К2) по группам научных специальностей: 2.5. Машиностроение (2.5.2; 2.5.3; 2.5.5; 2.5.6; 2.5.8), 2.6. Химические технологии, науки о материалах, металлургия (2.6.1; 2.6.17), 2.9. Транспортные системы (2.9.1; 2.9.3; 2.9.5).

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале «Транспортное машиностроение», допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции

© Брянский государственный технический университет, 2025

TRANSPORT SCIENTIFIC TECHNICAL JOURNAL ENGINEERING

From 2004 to 2021 - the journal "Bulletin of the Bryansk State Technical University";
Since 2022 - the journal "Transport engineering".

№ 7(43)
2025

ISSN: 2782-5957

DOI: 10.30987/2782-5957-2025-7

Journal is published monthly

Chairman of Editorial Council – **O.N. Fedonin**, *D.Eng., Prof.*

Vice-Chairman of Editorial Council – **M.N. Nagorkin**, *D.Eng., Prof.*

Editorial Council:

E.V. Ageev, *D.Eng., Prof., (Kursk)*

I.E. Agureev, *D.Eng., Prof., (Tula)*

A.Yu. Albagachiev, *D.Eng., Prof., (Moscow)*

D.Ya. Antipin, *Can.Eng., Ass. Prof., (Bryansk)*

V.Yu. Antsev, *D.Eng., Prof., (Tula)*

V.F. Bezyazychny, *D.Eng., Prof., (Rybinsk)*

S. G. Bishutin, *D.Eng., Prof., (Bryansk)*

I. A. Buyanovsky, *D.Eng., (Moscow)*

S.V. Dorokhin, *D.Eng., Ass. Prof., (Voronezh)*

A.O. Gorlenko, *D.Eng., Prof., (Bryansk)*

A.G. Ivakhnenko, *D.Eng., Prof., (Kursk)*

M.L. Kheifits, *D.Eng., Prof., (Minsk, Belarus)*

S.N. Khimukhin, *D.Eng., Prof., (Khabarovsk)*

A.V. Kirichek, *D.Eng., Prof., (Bryansk)*

A.S. Kosmodamianskiy, *D.Eng., Prof., (Moscow)*

V.V. Kuts, *D.Eng., Prof., (Kursk)*

K.V. Makarenko, *D.Eng., Prof., (Bryansk)*

V.F. Makarov, *D.Eng., Prof., (Perm)*

B.Ya. Mokritsky, *D.Eng., Prof., (Komsomolsk-upon Amur)*

D.I. Petreshin, *D.Eng., Ass. Prof., (Bryansk)*

K.V. Podmasteryev, *D.Eng., Prof., (Orel)*

A.A. Pugachev, *D.Eng., Ass. Prof., (Bryansk)*

V.I. Rassoha, *D.Eng., Ass. Prof., (Orenburg)*

L.A. Savin, *D.Eng., Prof., (Orel)*

M.G. Shalygin, *D.Eng., Ass. Prof., (Bryansk)*

S.G. Shantarenko, *D.Eng., Ass. Prof., (Omsk)*

V.P. Smolentsev, *D.Eng., Prof., (Voronezh)*

D.L. Solovyov, *D.Eng., Prof., (Murom)*

Yu.S. Stepanov, *D.Eng., Prof., (Orel)*

A.G. Suslov, *D.Eng., Prof., (Bryansk)*

D.N. Trushnikov, *D.Eng., (Perm)*

G.A. Turichin, *D.Eng., Prof., (St. Petersburg)*

L.G. Vainer, *D.Eng., Prof., (Khabarovsk)*

G.M. Volokhov, *D.Eng., Prof., (Kolomna)*

A.S. Yanyushkin, *D.Eng., Prof., (Cheboksary)*

Editorial Board:

Editor-in-Chief – **A.V. Khandozhko**, *D.Eng., Prof.*

Deputy Editor-in-Chief – **D.Ya. Antipin**, *Can. Eng*

Deputy Editor-in-Chief – **S.Yu. Syanov**, *Can. Eng*

Executive Secretary – **V.A. Tatarintsev**, *Can. Eng.*

Editor – **N.Yu. Lakalina**

Leading engineer – **V.A. Yerokhina**

Editorial Office Address:

7, 50 years of October Boulevard, Bryansk, 241035, Russia

Phone: +7 (4832) 58-82-77

Site: tu-bryansk.ru/info/zhurnaly

E-mail: trans-eng@tu-bryansk.ru

The journal is registered in the Federal Service for supervision of communications, information technologies and mass media. Series PI No. FS77 - 75522 of April 12, 2019

A journal is spread through a subscription which may be drawn up in any post-office or directly in the editorial office of the journal. Subscription index in the Internet-catalog "Press by Subscription": E80859.

Journal is included in a specialized bibliographical service CrossRef

Reprinting, all kinds of material copying and reproduction of materials published in the journal "Transport engineering" is allowed only with the Editorial Board's permission and a reference to the source of information

© Bryansk State Technical University, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение

- Шец С.П., Чеславский Л.В. Уменьшение износа деталей машин улучшением эксплуатационных свойств моторных масел 4
- Бишутин С.Г., Тотай А.В., Федоров В.П., Нагоркин М.Н. Прогнозирование параметров шероховатости обработанной поверхности с учетом способа правки шлифовального круга 11
- Кузьменко А.А., Макашин Д.С. Формообразование зубчатых колес внешнего зацепления с применением универсального абразивного инструмента 19

Материаловедение и технологии материалов

- Кривенков А.О., Крюков Д.Б., Гуськов М.С., Акимов А.А. Композиционный металлический материал с интерметаллическим упрочнением и регулируемым уровнем свойств 27
- Крюков Д.Б., Кривенков А.О., Гуськов М.С., Акимов А.А. Разработка нового типа гетерогенного броневых материала на основе алюминия и титана, полученного с применением сварки взрывом и исследование его свойств 35
- Пахомова С.А., Гресс М.А. Проектирование технологии вакуумной цементации сталей на основе математического моделирования 46

Транспортные системы

- Березин В.В., Спиров А.В., Панин Ю.А., Кулув Т.В., Ляшенко Т.В. Пути снижения силового воздействия скоростных электропоездов в кривых участках пути 55
- Кузьмин О.С., Луценко А.Н., Куликова Е.С., Антонычева Е.А. Альтернативный подход к увеличению надежности сливных приборов железнодорожных цистерн для перевозки нефтепродуктов и снижению рисков их несанкционированных разливов в пути следования 63
- Плотников И.В., Петров Г.И., Карачевский П.А. Обзор конструктивных особенностей вагонов-цистерн 72

Инженерная мысль России: личности, идеи, разработки

- Попков В.И. Борис Григорьевич Кеглин (к 90-летию со дня рождения) 81
- Суслов А.Г., Попков В.И. Петр Иванович Ящеричин (к 110-летию со дня рождения) 89

CONTENTS

Mechanical engineering

- S.P. Shets, L.V. Cheslavsky. Reducing the wear of machine parts by improving operational properties of motor vehicles. 4
- S.G. Bishutin, A.V. Totay, V.P. Fedorov, M.N. Nagorkin. Prediction of roughness parameters of the treated surface taking into account a dressing method of the grinding wheel 11
- A.A. Kuzmenko, D.S. Makashin. Shaping of gear wheels with external engagement using universal abrasive tool 19

Materials science and materials technology

- A.O. Krivenkov, D.B. Kryukov, M.S. Guskov, A.A. Akimov. Composite metal material with intermetallic hardening and adjustable level of properties 27
- D.B. Kryukov, A.O. Krivenkov, M.S. Guskov, A.A. Akimov. Development of a new type of heterogeneous armor aluminum and titanium-based material obtained using explosion welding and study of its properties 35
- S.A. Pakhomova, M.A. Gress. Designing the technology of vacuum carburizing of steels based on mathematical modeling 46

Transport systems

- V.V. Berezin, A.V. Spirov, Yu.A. Panin, T.V. Kuluv, T.V. Lyashenko. Ways to reduce the force impact of high-speed electric trains in curved sections of the track 55
- O.S. Kuzmin, A.N. Lutsenko, E.S. Kulikova, E.A. Antonicheva. An alternative approach to increase the reliability of railway tank drain devices for transportation of petroleum products and to reduce the risks of their unauthorized spills en route 63
- I.V. Plotnikov, G.I. Petrov, P.A. Karachevsky. Overview of the design features of tank cars 72

Russian engineering: personalities, ideas, developments

- V.I. Popkov. Boris Grigoryevich Keglina (to the 90th anniversary of his birth) 81
- A.G. Suslov, V.I. Popkov. Petr Ivanovich Yashcheritsyn (to the 110th anniversary of his birth) 89

Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.892.7

doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-4-10

УМЕНЬШЕНИЕ ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ МАШИН УЛУЧШЕНИЕМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

Сергей Петрович Шец¹, Леонид Вячеславович Чеславский²✉

^{1,2} ФГБОУ ВО Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ shetssp@mail.ru

² expert.everest@mail.ru

Аннотация

Цель исследования заключается в изучении влияния эксплуатационных свойств моторных масел на снижение износа деталей машин. В статье рассматриваются вопросы изменения вязкости масел, коэффициента трения, массы и состава микрочастиц износа в процессе эксплуатации. Особое внимание уделено сравнительному анализу вязкости до и после работы масла, а также исследованию элементного состава продуктов износа. В работе использованы современные методы трибологических испытаний, спектрального анализа и гравиметрического контроля. Новизна исследования со-

стоит в комплексном подходе к оценке эксплуатационных характеристик масел в реальных условиях работы двигателя и выявлении корреляции между физико-химическими свойствами масла и интенсивностью износа. В результате установлено, что применение современных присадок, а также контроль вязкости и состава масел, позволяет существенно уменьшить образование износных частиц и повысить ресурс деталей.

Ключевые слова: масло, износ, вязкость, коэффициент трения, свойства, продукты износа, состав, масло, трибология.

Ссылка для цитирования:

Шец С.П. Уменьшение износа деталей машин улучшением эксплуатационных свойств моторных масел / С.П. Шец, Л.В. Чеславский // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 7. – С. 4-10. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-4-10.

Original article

Open Access Article

REDUCING THE WEAR OF MACHINE PARTS BY IMPROVING OPERATIONAL PROPERTIES OF MOTOR VEHICLES

Sergey Petrovich Shets¹, Leonid Vyacheslavovich Cheslavsky²✉

^{1,2} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ shetssp@mail.ru

² expert.everest@mail.ru

Abstract

The study objective is to analyze the effect of the performance properties of engine oils on reducing the wear of machine parts. The paper discusses the issues of changing the viscosity of oils, friction factor, mass and composition of wear micro particles during operation. Special attention is paid to the comparative analysis of the viscosity before and after oil operation, as well as to the study of the elemental composition of

wear products. The work uses modern methods of tribological testing, spectral analysis and gravimetric control. The novelty of the research is in an integrated approach to assessing the performance characteristics of oils in real engine operating conditions and identifying a correlation between the physical and chemical properties of the oil and wear intensity. As a result, it is found out that the use of modern additives, as well as

control of the viscosity and composition of oils, can significantly reduce the formation of wear particles and increase the service life of parts.

Keywords: oil, wear, viscosity, friction factor, properties, wear products, composition, oil, tribology.

Reference for citing:

Shets SP, Cheslavsky LV. Reducing the wear of machine parts by improving operational properties of motor vehicles. Transport Engineering. 2025;7:4-10. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-4-10.

Введение

Проблема снижения износа машинных элементов продолжает оставаться актуальной в научных изысканиях и практической деятельности машиностроительного сектора. Износ рабочих поверхностей приводит к снижению эффективности, уменьшению рабочего ресурса и увеличению эксплуатационных затрат. В нынешних условиях особое внимание сосредоточено на оптимизации эксплуатационных свойств моторных смазочных материалов, рассматриваемых как ключевой параметр, определяющий срок службы механизмов.

Актуальность работы обусловлена возрастающими требованиями к экологичности и энергоэффективности транспортных средств, что делает необходимым снижение количества продуктов износа и повышение эксплуатационного ресурса машин. Современные исследования показывают, что физико-химические характеристики моторных масел, в частности ста-

бильность вязкости, способность к удержанию присадок и минимизация коэффициента трения, оказывают существенное влияние на интенсивность износа и образование микрочастиц в процессе работы. Несмотря на значительный прогресс в области создания новых масел, вопросы комплексной оценки их свойств в условиях эксплуатации остаются недостаточно изученными [1].

Обзор литературы свидетельствует о том, что большинство исследований сосредоточены на отдельных аспектах работы масел: изменении вязкости, анализе продуктов износа, влиянии присадок. Однако интеграция данных о вязкости, коэффициенте трения, составе масла и характеристиках износных частиц при работе двигателя может способствовать более точному прогнозированию ресурса деталей и разработке новых композиций масел с улучшенными эксплуатационными свойствами.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Экспериментальная часть исследования была организована таким образом, чтобы получить максимально объективные и воспроизводимые данные по изменению эксплуатационных свойств моторных масел и их влиянию на износ деталей машин. Для этого были отобраны три типа моторных масел: минеральное, полусинтетическое и полностью синтетическое, каждое из которых содержало различные пакеты присадок, включая цинк-фосфатные, молибденовые и боросодержащие соединения. Масла подбирались в соответствии с современными стандартами API и ACEA, их основные физико-химические параметры были проверены на соответствие заявленным производителем значениям до начала испытаний.

Перед началом серии лабораторных и эксплуатационных экспериментов образцы масел были подвергнуты анализу на нали-

чие и концентрацию базовых компонентов с помощью инфракрасной спектроскопии. На этом этапе удалось установить, что содержание синтетической основы в полностью синтетических маслах составляло не менее 70 %, наличие эффективного пакета противоизносных присадок подтверждалось характерными пиками в спектре, а количество диспергирующих и моющих добавок не превышало 12 % от общей массы. Для минеральных масел фиксировалось относительно высокое содержание парафиновых углеводородов и более низкая концентрация современных присадок.

Для определения кинематической вязкости на каждом этапе эксперимента применялся ротационный вискозиметр Brookfield, который позволял фиксировать показатели вязкости при температурах 40 °C, 60 °C, 80 °C и 100 °C. Например, ис-

ходная вязкость минерального масла при 40°C составляла 89,4 мм²/с, полусинтетического – 85,7 мм²/с, синтетического – 79,2 мм²/с. После 10000 км пробега эти значения снизились соответственно до 75,1 мм²/с, 71,8 мм²/с и 68,5 мм²/с, что свидетельствовало о разной степени деградации масел в процессе эксплуатации. Существенное снижение вязкости наблюдалось у минеральных и полусинтетических масел, что напрямую влияло на образование износных частиц и повышение коэффициента трения в парах трения.

Измерение коэффициента трения осуществлялось на трибометре Т-02У, где стандартная пара трения (сталь 45 – чугун СЧ20) подвергалась вращению в масляной ванне при нагрузке 200 Н и скорости скольжения 0,5 м/с. Свежие образцы масел обеспечивали коэффициент трения в диапазоне 0,065...0,072, но уже после 5 000 км пробега минеральное масло показывало рост этого параметра до 0,078, а после 15000 км – до 0,089. Для синтетических масел увеличение коэффициента трения было менее выражено: с 0,067 до 0,074 на пределе пробега. Это указывало на более стабильные смазывающие свойства синтетических и полусинтетических масел при длительной эксплуатации [2].

Для анализа состава продуктов износа и самого масла после различных этапов эксплуатации применялась масс-спектрометрия, что позволило зафиксировать изменение концентраций основных присадок. Так, количество цинк-фосфатных соединений в полусинтетическом масле снижалось с 0,12 % до 0,08 % на интервале 10000 км, а содержание диспергирующих присадок уменьшалось на 30 % в минеральных маслах. Это свидетельствовало о выработке присадочного пакета и снижении защитных свойств масла по мере его старения.

Гравиметрический анализ содержания частиц износа выполнялся путём пропускания образцов масла через мембранные фильтры с размером пор 0,8 мкм, после чего фильтры высушивались при температуре 105 °С и взвешивались на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. В среднем, после 5000 км пробега масса износных ча-

стиц в минеральном масле составляла 3,4 мг/100 мл, а после 15000 км – уже 7,2 мг/100 мл. В синтетическом масле эти значения были существенно ниже: 1,7 мг/100 мл после 5000 км и 3,6 мг/100мл после 15000 км.

Для определения элементного состава износных частиц после фильтрации использовали атомно-эмиссионную спектрометрию (AES), что позволило детально охарактеризовать природу износа. Для всех образцов характерно преобладание железа (Fe) – от 45 до 60 % общей массы частиц, значительная доля свинца (Pb) – до 12 %, меди (Cu) – до 9 %, а также присутствие алюминия (Al) и кремния (Si) в составе продуктов износа. При этом в образцах, эксплуатировавшихся на синтетическом масле, наблюдалось уменьшение доли свинца и меди, что указывает на меньший износ подшипников и вкладышей [3].

Важной частью работы было изучение динамики изменения всех перечисленных свойств масел на разных интервалах эксплуатации. Образцы отбирались на пробегах 0, 5000, 10000 и 15000 км, что позволило не только зафиксировать изменение свойств масла во времени, но и провести сопоставление с лабораторными контрольными испытаниями, где масла подвергались стандартным нагрузкам, но не использовались в реальных условиях ДВС. В контролируемой лабораторной среде снижение вязкости и рост массы частиц износа происходили медленнее, чем у масел, работавших в реальных двигателях, что говорит о существенном влиянии эксплуатационных факторов – температуры, скорости окисления, загрязнения сажей, топлива и микрочастицами металлов.

Таким образом, комплексный подход к эксперименту позволил получить достоверные количественные данные о деградации масел, динамике изменения их вязкости, коэффициента трения, массы и состава частиц износа, а также подтвердить, что применение современных синтетических масел с multifunctional пакетами присадок способствует существенному снижению интенсивности износа деталей машин при длительной эксплуатации.

Результаты

В результате проведённых экспериментов удалось получить развернутую картину изменения кинематической вязкости моторных масел в зависимости от условий эксплуатации и типа масла. На начальном этапе исследования все отобранные образцы масел имели кинематическую вязкость при температуре 40 °C в диапазоне от 78 мм²/с для синтетических до 92 мм²/с для минеральных масел. При температуре 100 °C значения вязкости составляли соответственно от 12,5 мм²/с у синтетических до 14,3 мм²/с у минеральных масел. Эти данные подтверждают, что базовые характеристики масел до начала эксплуатации соответствовали современным требованиям к смазочным материалам и обеспечивали формирование устойчивой смазочной плёнки в зоне контакта деталей.

Однако уже после 10000 км работы в двигателе было зафиксировано заметное снижение вязкости во всех исследованных маслах. Наиболее существенно деградация проявилась у минеральных масел, где кинематическая вязкость при 40 °C уменьшилась на 13...15 % и составила 78...80 мм²/с, а при 100 °C – снизилась до 12,2...12,5 мм²/с. Для полусинтетических масел снижение вязкости оказалось менее выраженным и составило примерно 10%, в то время как синтетические масла сохранили большую часть своих исходных свойств: их вязкость после 10 000 км эксплуатации снизилась не более чем на 8 %, оставаясь на уровне 72...74 мм²/с при 40 °C и 11,5...12,0 мм²/с при 100 °C. Это говорит о лучшей термической стабильности синтетических основ и эффективности многофункциональных пакетов присадок, которые замедляют окисление масла и препятствуют разрушению рабочих молекул при высоких температурах.

На динамику износа деталей существенное влияние оказал также коэффициент трения, измеряемый при помощи лабораторных испытаний на трибометре. Исходно, сразу после заливки свежего масла, этот показатель для всех типов масел находился в узком диапазоне: от 0,065 у синтетических до 0,072 у минеральных масел. По мере эксплуатации двигателя и де-

градации масла коэффициент трения постепенно возрастал. Наиболее значительный рост отмечен для минеральных масел, где после пробега 10000 км коэффициент трения достигал 0,083. Для синтетических масел аналогичный показатель увеличился лишь до 0,077, что подтверждает сохранение ими лучших смазывающих свойств и более стабильной смазочной плёнки даже по истечении длительного пробега [4].

Анализ массы износных частиц, выделенных из 100 мл отработанного масла, показал значительную разницу в зависимости от типа масла и его присадочного состава. Для минеральных масел масса извлечённых частиц после 10000 км эксплуатации колебалась в пределах 5,2...6,8 мг, что свидетельствует о достаточно интенсивном изнашивании рабочих поверхностей деталей двигателя. В случае синтетических масел этот показатель оказался заметно ниже – от 3,1 до 4,0 мг, что в среднем на 35...40 % меньше по сравнению с минеральными аналогами. Подобная разница объясняется, прежде всего, лучшими защитными и моющими свойствами синтетических масел, а также их способностью формировать более прочную и стабильную масляную плёнку на поверхности трущихся пар.

Детальный элементный анализ износных частиц, проведённый с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии, позволил установить, что основную долю в их составе занимают соединения железа, доля которых составляет 45...57 % в зависимости от типа масла и режима эксплуатации двигателя. Существенное присутствие свинца (8...12 %) связано с износом подшипников и вкладышей, а доля алюминия (до 6 %) указывает на износ поршней и поршневых колец. Примеси меди (5...9 %), обнаруженные в частицах износа, свидетельствуют о выработке коренных и шатунных подшипников двигателя. При этом в синтетических маслах отмечено уменьшение доли цветных металлов по сравнению с минеральными, что дополнительно подтверждает их превосходство в защите деталей от износа и продлении срока службы двигателя [5].

Таким образом, совокупность полученных экспериментальных данных демонстрирует, что эксплуатационные характеристики моторных масел – прежде всего показатели вязкости, коэффициента трения и масса изношенных частиц – тесно взаимосвязаны и определяют уровень износа деталей двигателя в процессе эксплуатации. Синтетические масла с современ-

ными присадками обеспечивают наиболее стабильные параметры на протяжении всего межсервисного интервала, существенно снижая интенсивность износа по сравнению с минеральными маслами, что подтверждается как лабораторными, так и эксплуатационными измерениями.

Распределение массы и состава частиц износа представлено в таблице.

Таблица

Масса и элементный состав частиц износа в моторных маслах после эксплуатации

Table

Mass and elemental composition of wear particles in engine oils after use

Тип масла	Масса частиц, мг/100 мл	Fe (%)	Pb (%)	Al (%)	Cu (%)
Минеральное	6,8	57	12	6	8
Полусинтетика	5,1	50	10	5	7
Синтетическое	3,1	45	8	4	5

Обсуждение/Заключение

Проведённые исследования убедительно продемонстрировали тесную связь между эксплуатационными свойствами моторных масел и интенсивностью износа рабочих поверхностей деталей машин, работающих в условиях высоких скоростей, температур и динамических нагрузок. Детальный анализ динамики вязкости моторных масел различных типов показал, что масла на синтетической основе демонстрируют существенно более высокую стабильность этого показателя в течение всего срока эксплуатации. Так, если для минеральных масел после 10000 км пробега было зафиксировано среднее снижение кинематической вязкости при 100 °C на 13,5 % (с 13,2 мм²/с до 11,4 мм²/с), а для полусинтетических масел – на 11 % (с 13,8 мм²/с до 12,3 мм²/с), то синтетические масла потеряли в вязкости не более 7,9 % (с 14,1 мм²/с до 13,0 мм²/с). Такое поведение свидетельствует о лучшей стабильности молекулярной структуры базового масла при длительном воздействии высоких температур и окислительных процессов, а также о способности синтетических масел сохранять оптимальную толщину смазочной плёнки в зоне контакта.

Рост коэффициента трения, неизбежно сопутствующий снижению вязкости и выработке присадочного пакета, также оказался существенно ниже у синтетиче-

ских масел. Так, для минеральных масел средний коэффициент трения увеличился с 0,072 до 0,089 после 10000 км пробега, что сопровождалось возрастанием температуры зоны контакта на 9...12 °C. Для синтетических масел этот показатель вырос лишь с 0,067 до 0,074, а локальное повышение температуры зоны трения не превышало 3...4 °C. Это означает, что синтетические масла не только обеспечивают меньший трениевый нагрев, но и способствуют существенному снижению энергетических потерь в двигателе.

Особое значение для прогноза ресурса двигателя имел сравнительный анализ массы и состава частиц износа, отфильтрованных из отработанных масел. Масса частиц износа, выделенных из 100 мл минерального масла после 10000 км эксплуатации, достигала 6,8 мг, а в случае полусинтетического масла – 5,1 мг. Для синтетических масел средняя масса частиц износа составила лишь 3,1 мг, что более чем в два раза ниже, чем у минеральных аналогов. Данные по массовой доле железа в частицах износа также оказались показательными: если для минеральных масел она доходила до 57 % от общей массы, то для синтетических – не превышала 45 %. Присутствие свинца, меди и алюминия в продуктах износа указывало на интенсивность изнашивания подшипников, вкладышей и

поршневых колец. В частности, в минеральных маслах содержание свинца доходило до 12 %, меди – до 8%, тогда как в синтетических маслах эти значения были на уровне 8 % и 5 % соответственно. Такой состав частиц износа свидетельствует о более мягком режиме работы трущихся пар при использовании синтетических масел, а также о лучшей защите антифрикционных покрытий за счёт эффективных присадок.

Комплексный анализ эксплуатационных свойств масел и продуктов их деградации не только позволяет объективно прогнозировать ресурс двигателя, но и обеспечивает возможность индивидуального подбора рецептуры масла под конкретные условия эксплуатации: климат, стиль вождения, тип двигателя. В процессе работы было зафиксировано, что снижение вязкости масла на 8...15 % после 10000 км пробега приводит к росту коэффициента трения на 10...22 % и одновременному увеличению массы частиц износа, особенно в случае масел с низкой концентрацией противоизносных и антиокислительных присадок.

Особое внимание в ходе анализа уделялось влиянию типа присадочного пакета на процесс износа. Масла, содержащие цинк-фосфатные, молибденовые и борсодержащие присадки, демонстрировали на 25...30 % меньшую массу износных частиц по сравнению с аналогичными маслами без подобных добавок. Это подтверждает, что современные многофункциональные присадки не только формируют прочную защитную плёнку на поверхности металла, но и способствуют стабилизации вязкости, снижая скорость окисления и термического разложения базового масла. Масс-спектрометрический анализ показал уменьшение концентрации цинк-фосфатных соединений на 30 % за 10 000 км, однако даже остаточного количества

присадок хватало для поддержания низкого уровня износа в синтетических маслах [6, 7].

Результаты анализа элементного состава частиц износа позволили выявить прямую корреляцию между ростом содержания железа и свинца и увеличением механического износа цилиндропоршневой группы. Так, при увеличении доли железа в частицах износа свыше 55 % наблюдалось ускоренное появление износных царапин на стенках цилиндра, что было подтверждено микроскопией поверхности. Это позволяет использовать спектральный анализ масла для ранней диагностики технического состояния двигателя и своевременного планирования замены масла или проведения ремонтных мероприятий.

В целом, полученные экспериментальные данные убедительно доказывают, что применение масел с высокой стабильностью вязкости, низким коэффициентом трения и эффективным пакетом современных присадок способствует существенному сокращению темпов изнашивания рабочих поверхностей, снижает вероятность аварийных отказов, уменьшает расходы на обслуживание и повышает надёжность работы машин. Предложенная методика комплексной оценки эксплуатационных свойств масел, включающая анализ вязкости, коэффициента трения, массы и состава частиц износа, а также мониторинг содержания ключевых элементов в продуктах износа, может быть рекомендована к внедрению в систему технического обслуживания автотранспортных и промышленных предприятий. Такой подход не только повышает технологическую культуру эксплуатации техники, но и открывает новые возможности для разработки масел с заданными эксплуатационными характеристиками, отвечающими требованиям конкретных потребителей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шалыгин М.Г., Ващишина А.П. Повышение износостойкости бандажа колеса локомотива улучшением антифрикционных свойств смазочного материала. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. №: 3 (83). Стр.45-53
2. Smith J.D., Jones R.B. Tribological performance of engine oils: A review. // Lubrication Science. 2020. Vol. 32(1). P. 50-62.

3. ASTM D445-19. Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids. ASTM International, 2019.
4. Dwyer-Joyce R.S., Drinkwater B.W., Donohoe C. The detection of debris in lubricating oil using acoustic emission // *Wear*. 2003. Vol. 256(12). P. 1236–1245.
5. Шалыгин М.Г., Ващишин С.П., Ващишина А.П. Исследование физико-химических и противоизносных свойств моторных масел по завершении процесса эксплуатации // *Транспортное машиностроение*. 2024. № 3 (27). С. 12-19.
6. 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*. Том 44. № 5. 2023. С.418-426.
7. Шец С.П., Горленко А.О., Шалыгин М.Г. Повышение эффективности образования гидродинамической смазки в подшипниках скольжения применением магнитной жидкости // *Строительные и дорожные машины*. 2023. № 5. С. 27-31.

REFERENCES

1. Shalygin MG, Vashchishina AP. Increasing the wear resistance of the locomotive wheel tire by improving the antifriction properties of the lubricant. *The Bulletin of the RSTU*. 2021;3(83):45-53.
2. Smith JD, Jones RB. Tribological performance of engine oils: review. *Lubrication Science*. 2020;32(1):50-62.
3. ASTM D445-19. Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids. ASTM International; 2019.
4. Dwyer-Joyce RS, Drinkwater BW, Donohoe C. The detection of debris in lubricating oil using acoustic emission. *Wear*. 2003;256(12):1236–1245.
5. Shalygin MG, Vashchinin SP, Vashchinina AP. Study of physico-chemical and anti-wear properties of motor oils at the end of operation. *Transport Engineering*. 2024;3(27):12-19.
6. Shalygin M.G., Buyanovskiy I.A., Samusenko V.D., Vashchishina A.P. Tribological properties of semi-fluid lubricant with surfactant additives. *Fric-tion and Wear*. 2023;44(5):418-426.
7. Shets SP, Gorlenko AO, Shalygin MG. Increasing the efficiency of hydrodynamic lubrication formation in bearings using magnetic fluid. *Stroitel'nye i Dorozhnye Mashiny*. 2023;5:27-31.

Информация об авторах:

Шец Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Производство и сервис в транспортном машиностроении» Брянского государственного технического университета, тел. +7 (4832) 56-09-95.

Shets Sergey Petrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Production and Service in Transport Engineering at Bryansk State Technical University, phone: +7 (4832) 56-09-95.

Чеславский Леонид Вячеславович – аспирант кафедры «ГТТС» Брянского государственного технического университета, тел. +7 (4832) 56-09-95.

Cheslavsky Leonid Vyacheslavovich – Postgraduate student at Bryansk State Technical University, phone: +7 (4832) 56-09-95.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 05.05.2025; одобрена после рецензирования 16.05.2025; принята к публикации 26.06.2025. Рецензент – Погonyшев В.А., доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика, физика и математика» «Брянского государственного аграрного университета».

The article was submitted to the editorial office on 05.05.2025; approved after review on 16.05.2025; accepted for publication on 26.05.2025. The reviewer is Pogonysh V.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Automation, Physics and Mathematics at Bryansk State Agrarian University.

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.923

doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-11-18

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ С УЧЕТОМ СПОСОБА ПРАВКИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

Сергей Геннадьевич Бишутин^{1✉}, Анатолий Васильевич Тотай², Владимир Павлович Федоров³, Максим Николаевич Нагоркин⁴

^{1,2,3,4} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ nad-bisch@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9430-2936>

² totai_av@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4794-9881>

³ fedorvlad44@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2113-6567>

⁴ nagorkin_mn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4536-7522>

Аннотация

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния способов правки шлифовальных кругов на высотные и шаговые параметры шероховатости обработанных поверхностей деталей. Представлены аналитические зависимости для расчёта параметров шероховатости поверхностей заготовок, обработанных шлифованием после различных способов правки абразивных кругов, достоверность которых подтверждена экспериментальными исследованиями. Установлено, что для обеспечения шлифованием шероховатости поверхности с высотным параметром R_a менее 0,4 мкм рекомендуется применять правку абразивного круга однокристалльным алмазным инструментом (алмаз в оправе, алмазный карандаш). Для обеспечения шероховатости с параметром R_a в диапазоне 0,4 – 0,8 мкм рекомендуется осуществлять правку шлифовального круга роликом или многокристалльным алмазным карандашом. Правка шлифовальных кругов твердосплавными дисками позволит обеспечить шероховатость поверхности после обработки с параметром R_a более

0,8 мкм. Установлено, что на шаговые параметры шероховатости поверхностей заготовок, обработанных шлифованием, значимое влияние оказывает радиус скругления вершин абразивных зёрен. При этом среднее значение шага неровностей профиля шероховатости по средней линии S_m в 2 – 3 раза больше среднего значения шага S местных выступов профиля шероховатости. Поэтому формирование микронеровностей поверхности с заданным соотношением высотных и шаговых параметров возможно путём подбора зернистости шлифовального круга, влияющей на радиус скругления вершин зёрен. Представлены научно обоснованные рекомендации по выбору методов правки абразивных инструментов и условий технологического обеспечения параметров шероховатости поверхностей заготовок, обрабатываемых методами шлифования периферией круга.

Ключевые слова: шлифование, круг, правка, инструмент, вершина, абразивное зерно, параметры, шероховатость.

Ссылка для цитирования:

Бишутин С.Г. Прогнозирование параметров шероховатости и обработанной поверхности с учетом способа правки шлифовального круга / С.Г. Бишутин, А.В. Тотай, В.П. Федоров, М.Н. Нагоркин // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 7. – С. 11-18. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-11-18.

Original article

Open Access Article

PREDICTION OF ROUGHNESS PARAMETERS OF THE TREATED SURFACE TAKING INTO ACCOUNT A DRESSING METHOD OF THE GRINDING WHEEL

Sergey Gennadyevich Bishutin^{1✉}, Anatoly Vasilyevich Totay², Vladimir Pavlovich Fedorov³, Maksim Nikolaevich Nagorkin⁴

© Бишутин С. Г., Тотай А. В., Федоров В. П., Нагоркин М. Н., 2025

Abstract

The paper presents the results of theoretical and experimental studies of the effect of grinding wheel dressing methods on the height and pitch parameters of the roughness of the part surfaces treated. Analytical dependences are presented for calculating the roughness parameters of the surfaces of workpieces treated by grinding after various methods of dressing abrasive wheels, the reliability of which is confirmed by experimental studies. It is found out that in order to ensure surface roughness with a height parameter R_a of less than 0.4 microns, it is recommended to use an abrasive wheel dressing with a single-crystal diamond tool (diamond in a rim, diamond pencil). To ensure roughness with the parameter R_a in the range of 0.4 – 0.8 microns, it is recommended to dress the grinding wheel with a roller or a multi-crystal diamond pencil. Dressing the grinding wheels with carbide discs will ensure surface roughness after treatment with R_a parameter of

more than 0.8 microns. It is found out that the radius of rounding of the tops of abrasive grains has a significant effect on the step parameters of the roughness of workpiece surfaces treated by grinding. At the same time, the average step value of the roughness profile irregularities along S_m mean line is 2-3 times greater than the average step value S of the local protrusions of the roughness profile. Therefore, the formation of fine irregularities of the surface with a given ratio of height and pitch parameters is possible by selecting the grain size of the grinding wheel, which affects the radius of rounding of the grain vertices. The paper presents scientifically based recommendations on the choice of methods for dressing abrasive tools and the conditions for maintenance of the roughness parameters of the workpiece surfaces processed by grinding wheel face.

Keywords: grinding, wheel, dressing, tool, tip, abrasive grain, parameters, roughness.

Reference for citing:

Bishutin SG, Totai AV, Fedorov VP, Nagorkin MN. Prediction of roughness parameters of the treated surface taking into account a dressing method of the grinding wheel. *Transport Engineering*. 2025;7:11-18. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-11-18.

Введение

Качество поверхности детали, обработанной методом шлифования в значительной степени определяется состоянием рабочей поверхности шлифовального круга, которое формируется в процессе правки этого абразивного инструмента [1, 2]. Варьирование условий правки шлифовального круга может приводить к изменению в 1,5...2,5 раза значений параметров шероховатости поверхности [3, 4]. Имеющиеся в современной научной литературе рекомендации по выбору способов и режимов правки шлифовальных кругов не позволя-

ют определить численные значения интересующих высотных и шаговых параметров шероховатости обрабатываемой поверхности на стадии проектирования технологической операции шлифования. В связи с этим, представленные в статье исследования, посвященные научно обоснованному выбору способов правки шлифовальных кругов и режимов обработки заготовок для обеспечения требуемых параметров шероховатости поверхностей, являются актуальными.

Моделирование процессов формирования шероховатости поверхностей шлифованием

На рис. 1 представлена схема круглого шлифования периферией круга поверхности заготовки.

Обработка заготовки 4 осуществляется шлифовальным кругом со скоростью D_t и подачей D_s . Абразивные зёрна 2, расположенные на периферии и торцах инструмента и соединенные с помощью связки 5, режущими вершинами 6 с радиусом скругления ρ формируют на обраба-

тываемой поверхности срезы 3 толщиной a_z , контуры которых образуют поперечную шероховатость 7.

Исследование топографии поверхности заготовки, обработанной шлифованием, показывает, что она представляет собой совокупность параллельных друг другу рисков-царапин, длина которых в десятки и сотни раз больше их ширины и глубины (рис. 2).

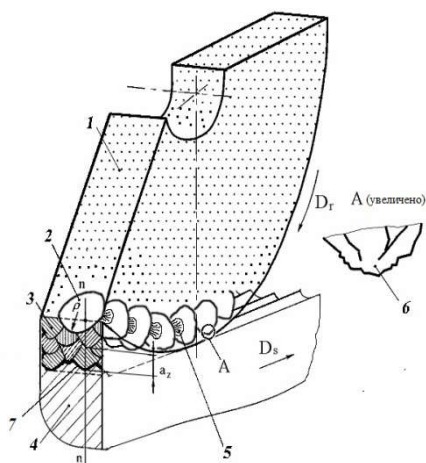


Рис.1. Схема процесса шлифования поверхности заготовки

Fig. 1. Scheme of the workpiece surface grinding process

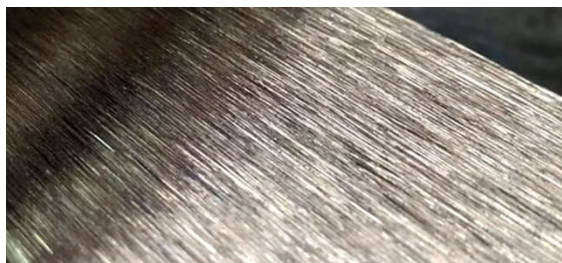


Рис. 2. Топография поверхности заготовки после шлифования

Fig. 2. Surface topography of the workpiece after grinding

При шлифовании по другим схемам процессы формирования профиля шероховатости принципиально отличаться не будут.

Анализ схемы процесса шлифования поверхности заготовки показывает, что на процесс формирования профиля шероховатости значительное влияние оказывают геометрическая форма и число зёрен абразивного инструмента, которые контактируют с обрабатываемой поверхностью, и распределение вершин зерен по высоте [4, 5].

Таким образом, для прогнозирова-

ния значений параметров шероховатости поверхности после шлифования заготовок необходимо знать:

- зависимость значений параметров шероховатости (например, R_z) от числа зёрен, участвующих в формировании микропрофиля, радиуса скругления вершин зерен и распределения их по высоте;
- зависимость, характеризующую влияние технологических факторов обработки на число зёрен, контактирующих с обрабатываемой поверхностью при шлифовании.

Совместное решение этих зависимостей, установленных в различных исследованиях, позволило получить следующее соотношение для параметра шероховатости R_z :

$$R_z = C \rho^k m^n t^f, \quad (1)$$

где C , k , n , f – коэффициенты, значения которых зависят взаимного расположения рабочей поверхности абразивного инструмента и обрабатываемой поверхности; ρ – среднее значение радиуса скругления вершин абразивных зёрен, находящихся на рабочей поверхности шлифовального круга (зависит от размера зёрен и их материала, степени их износа); m – число вершин зёрен, проходящих через участок поверхности обработки за единицу времени; t – толщина удаляемого слоя металла за один рабочий ход инструмента.

Уравнение (1) позволяет прогнозировать значения параметров шероховатости после шлифования поверхностей заготовок различными методами.

Например, для круглого шлифования периферией круга (наружного и внутреннего) и плоского шлифования уравнение (1) после ряда преобразований принимает следующий вид [4, 5]:

$$R_z = \frac{150 \rho^{-0,25} t^{0,5}}{\left(k_A m \frac{V_E}{V_C} A^{0,5} q \left[0,62 \frac{N}{V} \right]^{-2} F_c H \right)^{0,5}} k_C, \quad (2)$$

где t – глубина резания; k_C – коэффициент, учитывающий вид применяемого смазочно-охлаждающего технологического сред-

ства; k_B – коэффициент, учитывающий влияние колебаний рабочей поверхности инструмента относительно поверхности

обработки; m – коэффициент, учитывающий число абразивных зёрен на рабочей поверхности; V_k – скорость вращения круга; V_z – скорость вращения заготовки; A – коэффициент учитывающий диаметр заготовки D_z и диаметр круга D_k : при круглом (+) или внутреннем (–) шлифовании периферией круга $A = D_z D_k / (D_z \pm D_k)$, при плоском шлифовании $A = D_k$; q – коэффициент, учитывающий вид микрорельефа вершин абразивных зёрен; N – зернистость шлифовального круга; V – объёмное содержание зёрен в круге; F_c – доля зёрен на рабочей поверхности инструмента, вершины которых формируют профиль шероховатости поверхности обработки; H – число контактов участка поверхности заготовки с абразивным инструментом в зависимости от режимов обработки и времени выхаживания.

Анализ уравнения (2) показывает, что на формирование высотных параметров шероховатости наибольшее влияние оказывают зернистость шлифовального круга, объёмное содержание зёрен, скорость обработки, время выхаживания поверхности.

Другие параметры шероховатости рассчитываются по зависимостям (3), учи-

тывающим форму зоны контакта обрабатываемой поверхности с абразивным инструментом, кинематику процесса формообразования при обработке шлифованием, распределение профиля впадин шероховатости (шлифовочных царапин) по длине и высоте, радиус скругления вершин абразивных зёрен [5, 6]:

$$\left. \begin{aligned} Ra &= 0,15Rz \\ S &= 3,5 \cdot 10^{-3} (\rho Ra)^{0,5} \\ Sm &= 1 \cdot 10^{-2} (\rho Ra)^{0,5} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где Rz , Ra , S , Sm – параметры шероховатости.

Из уравнений (3) следует, что на соотношение высотных и шаговых параметров шероховатости шлифованной поверхности влияет радиус скругления вершин зёрен, который, в свою очередь, зависит от зернистости шлифовального инструмента.

Таким образом, параметр F_c в зависимости (2) учитывает разницу высот вершин зёрен на рабочей поверхности круга и, следовательно, зависит от способа и режима правки шлифовального инструмента. Определим зависимости для расчёта этого параметра.

Оценка влияния правки шлифовальных инструментов на состояние их рабочих поверхностей

Для оценки состояния рабочей поверхности абразивного инструмента применяют интегральную функцию $F_\Sigma(z)$, которая учитывает распределение по глубине z поверхности вершин абразивных зёрен.

В исследованиях [5, 7] показано, что для рабочей поверхности шлифовального круга после правки функция $F_\Sigma(z)$ может принимать значения в пределах от 0 до 1.

инструментов на состояние их рабочих по-

Таким образом, задав назначая величину z , можно определить долю вершин зёрен рабочей поверхности шлифовального инструмента, от доли всех зёрен поверхностного слоя инструмента толщиной z .

Очевидно, что $F_c = F_\Sigma(t)$. В таком случае параметр F_c можно определить по зависимостям

$$F_c = \begin{cases} (A^* + BC/[0,008N]) \frac{t}{E}, & 0 \leq t \leq E; \\ (A^* + BC/[0,008N]) \left(1 + 0,2 \frac{t-E}{E} \right), & t \geq E. \end{cases} \quad (4)$$

Значения A^* , B , C зависят от характеристик шлифовального круга и являются расчётными величинами. Результаты расчёта этих величин представлены в табл. 1.

Величина E в зависимости (4) определялась экспериментально. При проведении экспериментов электрокорундовый шлифовальный круг прямого профиля

устанавливался на станке 3У12В и подвергался правке алмазом в оправе (ГОСТ 22908-78), многокристалльным алмазным

карандашом (ГОСТ 607-80), алмазным роликом (ГОСТ 16014-78) и твердосплавным диском (ГОСТ 4802-53).

Таблица 1

Значения A^* , В и С для электрокорундовых шлифовальных кругов

Table 1

A^* , В and C values for aluminum oxide wheels

Параметр	Твёрдость круга по ГОСТ Р 52587-2006, ГОСТ Р 52781-2007										
	H, I, J			K, L, M				N, O, P			
	Зернистость круга по ГОСТ 52381-2005 ГОСТ Р 52781-2007										
	F70 – 90	F54 – 60	F36 – 46	F70 – 90	F54 – 60	F36 – 46	F30	F70 – 90	F54 – 60	F36 – 46	F30
A*	0,07	0,06	0,055	0,12	0,11	0,095	0,085	0,13	0,11	0,10	0,09
C	0,05	0,04	0,025	0,045	0,04	0,02	0,01	0,045	0,04	0,02	0,01
B	0,97	1,0	1,0	0,86	0,89	0,91	0,95	0,82	0,85	0,87	0,91

При правке объектом обработки являлся шлифовальный круг, а правящий инструмент, закреплённый в приспособлении на столе станка, перемещался вдоль шлифовального круга с определённой скоростью, удаляя его поверхностные слои за несколько ходов. С помощью алмаза в оправе и алмазного карандаша осуществлялось обтачивание шлифовального круга, а при помощи алмазного ролика и твердосплавного диска – обкатывание шлифовального круга. Правка круга осуществлялась при следующих режимах движения правящего инструмента: продольная подача – 0,25...0,3 м/мин; поперечная подача – 0,02 мм/дв. ход; число рабочих ходов – 4; число выхаживающих ходов – 2. Охлаждение правящего инструмента осуществлялась свободным поливом эмульсией.

Затем после внедрения специальных

свинцовых пластин в поверхность инструмента снимались отпечатки рабочей поверхности. Вершин абразивных зёрен формировали лунки различной глубины в пределах длины контакта пластин с абразивным инструментом. Вершины наиболее выступающих зёрен рабочей поверхности шлифовального инструмента формировали лунки максимальной глубины в центре зоны его контакта с пластиной.

Анализ отпечатков на пластинах проводился в соответствии с методикой, представленной в работе [7], после чего строились кривые $F_z(z)$, с помощью которых определялись численные значения величин E .

Полученные значения E представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения E , мкм

Table 2

E values, microns

Правящий инструмент		
Алмаз в оправе	Алмазный карандаш и ролик	Твердосплавный диск
10...15	20...30	35...50

Исследования показали, что минимальная разновысотность (не более 15 мкм) вершин зёрен наблюдается при правке однокристалльным алмазным инструментом (алмазом в оправе). Большее значение разновысотности режущих вершин (20...30 мкм) обеспечивает правка алмазным карандашом и роликом. Макси-

мальная разновысотность вершин абразивных частиц (до 50 мкм) формировалась в процессе правки твердосплавным диском.

При меньшей величине E в поверхностном слое круга будет большее число вершин зёрен, что приведет к меньшей высоте микронеровностей поверхности. А при большем значении E будет формиро-

ваться более грубая шероховатость поверхности. Для подтверждения правильно-

сти теоретических изысканий был проведен ряд экспериментов.

Экспериментальная проверка теоретических результатов

При проведении экспериментов осуществлялась обработка цилиндрических образцов (сталь 45, HRC 42...45) шлифовальным кругом прямого профиля из электрокорунда зернистостью F46 методом продольной подачи.

Для стабилизации силового и термического воздействий на обрабатываемую поверхность в ходе проведения экспериментов и для устранения влияния технологической наследственности осуществлялось предварительное шлифование образцов для снятия дефектного слоя материала.

Перед каждым опытным экспериментом осуществлялась правка шлифовального круга одним из перечисленных ранее правящих инструментов с соответствующими режимами.

После того, как с рабочей поверхности шлифовального круга снимались отпечатки свинцовыми пластинами, цилиндри-

ческий образец, установленный в центрах шлифовального станка 3У12В, шлифовался с припуском 0,1 мм на сторону. При этом скорость вращения заготовки составила 25 м/мин, скорость вращения круга – 27 м/с, продольная подача – 0,75 м/мин, глубина шлифования – 10 мкм. Охлаждение зоны обработки производилось свободным поливом эмульсией.

Параметры шероховатости поверхностей образцов измерялись на профилографе-профилометре мод. БВ-7669М и их значения сравнивались с значениями параметров шероховатости, рассчитанными по зависимостям (2) – (4).

В табл. 3. представлены значения параметров шероховатости поверхностей образцов, обработанных шлифовальными кругами после различных видов правки, как полученные экспериментально, так и расчетные.

Таблица 3

Значения параметров шероховатости поверхностей образцов, обработанных шлифованием абразивными инструментами после различных методов правки

Table 3

Values of roughness parameters of sample surfaces treated by grinding with abrasive tools after various dressing methods

Параметр шероховатости	Правящий инструмент		
	Алмаз в оправе	Алмазный карандаш и ролик	Твердосплавной диск
Ra, мкм	$\frac{0,35 \pm 0,03}{0,4}$	$\frac{0,50 \pm 0,03}{0,60}$	$\frac{0,85 \pm 0,04}{0,90}$
Rz, мкм	$\frac{2,1 \pm 0,4}{2,7}$	$\frac{2,9 \pm 0,3}{4,0}$	$\frac{5,0 \pm 0,25}{6,0}$
Sm, мкм	$\frac{37,6 \pm 3,0}{35,0}$	$\frac{43,5 \pm 3,5}{45,5}$	$\frac{48,5 \pm 2,8}{54,5}$
S, мкм	$\frac{17,5 \pm 2,4}{12,0}$	$\frac{20,0 \pm 2,5}{15,2}$	$\frac{23,5 \pm 2,2}{19,5}$

Примечания: в числителе указаны экспериментальные значения параметров шероховатости и их 95%-ные доверительные интервалы; в знаменателе указаны расчётные значения параметров шероховатости

Результаты экспериментов показывают, что способ правки шлифовального круга существенно влияет на значения параметров шероховатости поверхности. Из-

менения высотных параметров шероховатости находились в пределах от 2 до 2,5 раз. Шаговые параметры изменялись в 1,3...1,5 раза. Отношения между высот-

ными и шаговыми параметрами шероховатости поверхностей составили: $R_z / R_a = 6...6,5$; $S_m / S = 2...3$.

Экспериментальные значения пара-

метров шероховатости отличались от рассчитанных по зависимостям (2) – (4) значений на 5...32 %, что можно считать приемлемым.

Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют утверждать следующее:

1. Существенное влияние на формирование параметров шероховатости поверхностей деталей в процессе шлифования оказывают: способ правки шлифовального круга, скорость шлифования, зернистость инструмента и объемное содержание зёрен в круге, время выхаживания поверхности в процессе шлифования.

2. Для обеспечения при шлифовании высотного параметра шероховатости R_a менее 0,4 мкм следует применять правку однокристалльным алмазным инструментом (алмазом в оправе или алмазной иглой).

3. При необходимости обеспечения параметра шероховатости R_a в пределах от 0,4 до 0,8 мкм шлифовальный круг целесообразно править многокристалльным алмазным карандашом или роликом.

4. Для получения шероховатости обработанной поверхности с параметром R_a более 0,8 мкм в качестве правящего инструмента можно использовать твердо-

сплавные диски.

5. На шаговые параметры шероховатости поверхностей заготовок, обработанных шлифованием, значимое влияние оказывает радиус скругления вершин абразивных зёрен. При этом среднее значение шага неровностей профиля шероховатости по средней линии S_m в 2...3 раза больше среднего значения шага S местных выступов профиля шероховатости. Поэтому получение микронеровностей поверхности с заданным соотношением высотных и шаговых параметров возможно путём подбора зернистости шлифовального круга, влияющей на радиус скругления вершин зёрен.

Представленные результаты исследований позволяют проводить целенаправленный выбор способов правки абразивных инструментов и режимов шлифования заготовок, что позволит обеспечить требуемые параметры шероховатости поверхностей деталей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кремень З.И., Юрьев В.Г. Технология шлифования в машиностроении. Санкт-Петербург : Политехника. 2007. 424 с.
2. Киселев Е.С., Кольваногов В.Н. Теплофизический анализ концентрированных операций шлифования. Ульяновск : УлГТУ. 2002. 139 с.
3. Инженерия поверхности деталей. Под ред. А.Г. Суслова. Москва : Машиностроение. 2008. 320 с.
4. Бишутин С.Г. Качество и износостойкость шлифованных поверхностей деталей автомобилей. Брянск : Десяточка. 2011. 100 с.

5. Бишутин С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании. Москва : Машиностроение-1. 2004. 144 с.
6. Суслов. А.Г., Бишутин С.Г. Математическая модель шероховатости шлифованной поверхности. Справочник. Инженерный журнал. 2004. № 8. С. 17-20..
7. Бишутин С. Г. Изменение состояния абразивного инструмента в процессе шлифования. Станки и инструмент. 2004. № 5. С. 27-29.

REFERENCES

1. Kremen ZI, Yuryev VG. Grinding technology in mechanical engineering. St. Petersburg: Polytechnic; 2007.
2. Kiselev ES, Kovalnogov VN. Thermophysical analysis of concentrated grinding operations. Ulyanovsk: UIGTU; 2002.
3. Suslov AG, editor. Surface engineering of parts. Moscow: Mashinostroenie; 2008.

4. Bishutin SG. Quality and wear resistance of ground surfaces of automobile parts. Bryansk: Desyatochka; 2011.
5. Bishutin SG. Ensuring the required consistency of the quality parameters of part surface layers during grinding. Moscow: Mashinostroenie-1; 2004.

6. Suslov AG, Bishutin SG. Mathematical model of the roughness of a polished surface: handbook. Engineering journ. 2004;8:17-20.

7. Bishutin SG. Changing the state of abrasive tools while grinding. STIN. 2004;5:27-29.

Информация об авторах:

Бишутин Сергей Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Производство и сервис в транспортном машиностроении» Брянского государственного технического университета, тел. 8-483-256-02-61, Author-ID-РИНЦ: 174978.

Тотай Анатолий Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техносферная безопасность» Брянского государственного технического университета, тел. 8-910-743-51-85, Author-ID-РИНЦ: 453423.

Bishutin Sergey Gennadyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Production and Service in Transport Engineering at Bryansk State Technical University, phone: 8-483-256-02-61, Author-ID-RSCI: 174978.

Totay Anatoly Vasilyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technosphere Safety at Bryansk State Technical University, phone: 8-910-743-51-85, Author-ID-RSCI: 453423.

Федоров Владимир Павлович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» Брянского государственного технического университета, тел. +7-980-315-77-09, Author-ID-РИНЦ: 694695.

Нагоркин Максим Николаевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность» Брянского государственного технического университета, тел. +7-960-552-61-25, Author-ID-РИНЦ: 391768.

Fedorov Vladimir Pavlovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology at Bryansk State Technical University, phone: +7-980-315-77-09, Author-ID-RSCI: 694695.

Nagorkin Maksim Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technosphere Safety at Bryansk State Technical University, phone: +7-960-552-61-25, Author-ID-RSCI: 391768.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 23.05.2025; одобрена после рецензирования 29.05.2025; принята к публикации 26.06.2025. Рецензент – Соловьев Д.Л. доктор технических наук, профессор Муромского филиала (института) Владимирского государственного университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 23.05.2025; approved after review on 29.05.2025; accepted for publication on 26.06.2025. The reviewer is Solovyov D.L., Doctor of Technical Sciences, Professor of Muro m Branch (Institut e) of Vladimir State University, member of the Editorial Council of the journal Transport Engineering.

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621.9.023:621.833

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ВНЕШНЕГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ УНИВЕРСАЛЬНОГО АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Андрей Алексеевич Кузьменко¹, Дмитрий Сергеевич Макашин²✉

^{1,2} Omsk State Technical University, Omsk, Russia

¹ aakuzmenko@st.omgtu.ru; <https://orcid.org/0009-0007-4910-6358>

² dima.makashin@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8297-5551>

Аннотация

В статье рассматривается проблема изготовления зубчатых колёс в условиях мелкосерийного и единичного производства. В работе предлагается использование для формообразования зубчатых колёс отрезного абразивного диска для угловых шлифовальных машин. Описаны две стратегии формообразования впадин зубчатых колёс внешнего зацепления: ступенчатое радиальное врезание и касательное врезание по эвольвенте. Эффективность предложенных стратегий оценивалась по площади остаточного припуска в торцевой плоскости колеса. В ходе исследования были смоделированы процессы обработки с использованием систе-

ма автоматизированного проектирования КОМПАС-3D для зубчатых колёс с модулем равным 2 мм и числами зубьев равными 90 или 19. Результаты исследования продемонстрировали, что вторая стратегия позволяет сократить число проходов обработки до двух раз. Полученные результаты подтверждают перспективность применения этого метода в условиях мелкосерийного и единичного производства.

Ключевые слова: зубчатые колёса, обработка, резание, инструмент, абразивный диск, формообразование, производство.

Ссылка для цитирования:

Кузьменко А.А. Формообразование зубчатых колёс внешнего зацепления с применением универсального абразивного инструмента / А.А. Кузьменко, Д.С. Макашин // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 7. – С. 19-26.

Original article
Open Access Article

SHAPING OF GEAR WHEELS WITH EXTERNAL ENGAGEMENT USING UNIVERSAL ABRASIVE TOOL

Andrey Alekseevich Kuzmenko¹, Dmitry Sergeevich Makashin²✉

^{1,2} Omsk State Technical University, Omsk, Russia

¹ aakuzmenko@st.omgtu.ru; <https://orcid.org/0009-0007-4910-6358>

² dima.makashin@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8297-5551>

Abstract

The paper considers the problem of manufacturing gear wheels in conditions of small-scale and single-piece production. In order to shape gear wheels, it is proposed to use an abrasive cutting disc for angle grinders. Two strategies for shaping the slots of gear wheels with external engagement are described: stepwise radial plunging and tangential plunging along the involute. The effectiveness of the proposed strategies was estimated by the area of the residual allowance in the end plane of the wheel. During the study, treatment

processes were modeled using COMPASS-3D automated design system for gears with 2 mm modulus and tooth numbers of 90 or 19. The study results showed that the second strategy makes it possible to reduce the number of treatment passes by up to two times. The results obtained confirm the prospects of using this method in conditions of small-scale and single-piece production.

Keywords: gear wheels, treatment, cutting, tool, abrasive disc, shaping, production.

Reference for citing:

Kuzmerko AA, Makashin DS. Shaping of gear wheels with external engagement using universal abrasive tool. Transport Engineering. 2025;7:19-26. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-19-26.

Введение

Зубчатые колёса являются неотъемлемой частью механизмов и машин. От качества их изготовления зависит точность, правильность работы и долговечность узлов. В течение последнего десятилетия в отечественной сфере зубообработки не наблюдается существенных технологических изменений [1, 2]. Парк оборудования остаётся на прежнем уровне, а внедрение принципиально новых методов обработки практически отсутствует. Несмотря на наличие на рынке современных зарубежных станков, их приобретение в условиях текущей экономической ситуации сопряжено со значительными трудностями [3], поэтому на производственных предприя-

тиях продолжается эксплуатация устаревшего оборудования и инструментов [4, 5].

Особенно такая ситуация характерна для предприятий, специализирующихся на мелкосерийном и единичном производстве. В большинстве случаев небольшие компании не располагают специализированным зубообрабатывающим оборудованием, что вынуждает их либо отказываться от заказов на изготовление зубчатых колёс, либо передавать эти технологические операции на сторонние организации [6]. Все это приводит к усложнению производственного процесса и увеличению финансовых затрат [7].

Постановка задачи

В условиях ограниченной доступности узкоспециализированного оборудования и инструмента в единичном производстве появляется необходимость поиска альтернативных технологических подходов. Одним из таких подходов является использование универсального режущего инструмента, который может обеспечить требуемое качество поверхности после обработки [8].

Цель работы состоит в исследовании перспективности применения отрезного абразивного инструмента в качестве альтернативного средства обработки зубчатых колес.

Гипотеза работы состоит в том, что использование отрезного абразивного инструмента позволит достичь требуемого качества обработанной поверхности профиля зубчатого колеса в условиях мелкосерийного и единичного производства.

Теория

Существует два основных традиционных метода обработки впадин зубчатых колёс: метод копирования и метод огибания (рис. 1) [9].

Метод копирования заключается в удалении припуска режущим инструментом, профиль которого геометрически соответствует форме впадины зубчатого колеса [10]. Обработка каждой впадины производится последовательно с применением механизма поворота заготовки на угол, соответствующий угловому шагу зубчатого колеса. К этому методу относятся такие виды обработки, как фрезерование пальцевыми или дисковыми модульными фрезами, шлифование профильными абразив-

ными кругами, зубострогание, зубопротягивание [11].

Метод огибания подразумевает снятие припуска в процессе согласованных между собой вращений режущего инструмента и заготовки. Инструмент с заготовкой благодаря, взаимосвязанным движениям подачи, воспроизводят обкат пары сопряжённых элементов зубчатой передачи. К этому методу относятся фрезерование червячными фрезами или фрезами-летучками, зубодолбление, строгание зуборезной рейкой, шлифование червячными или тарельчатыми абразивными кругами, шевингование [12, 13].

Для всех вышеперечисленных классических способов обработки нужен профильный режущий инструмент. Кроме этих методов в последнее время стала использоваться лазерная резка и электроэрозионная обработка [14]. При использовании этих методов обработки геометрическая форма впадин зубчатых колёс образуется за счёт движения непрофильного инструмента по заданной криволинейной траектории [15]. Технологии лазерной резки и электроэрозионной обработки из-за своей новизны описаны в научных работах в меньшей степени. Но по известным данным однозначно можно сказать, что лазер-

ная обработка имеет серьёзное ограничение в связи с зависимостью шероховатости рабочих поверхностей колеса от его высоты – допустимая шероховатость достигается лишь при высоте до 3 мм [16, 17]. Электроэрозионная обработка позволяет достичь требуемых параметров шероховатости и точности обработанной поверхности, но при этом она характеризуется значительными временными затратами по сравнению с методами копирования и огибания. Несмотря на перспективность лазерной резки и электроэрозионной обработки, эти технологии не эффективны в условиях мелкосерийного производства.

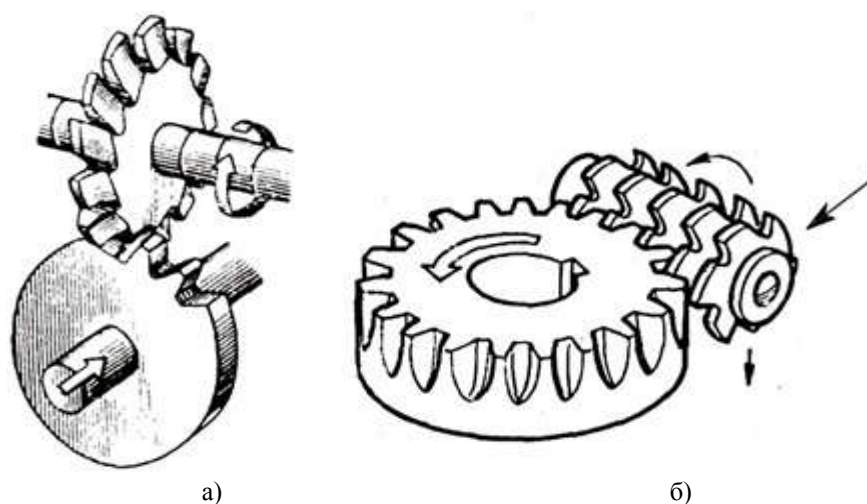


Рис. 1. Схемы нарезания зубчатых колес: а – методом копирования (дискowej модульной фрезой); б – методом огибания (червячной фрезой)
Fig. 1. Schemes of gear cutting: a) by copying method (disk modular milling cutter); b) by enveloping method (worm milling cutter)

Метод огибания позволяет достичь наилучших показателей точности обработанных зубчатых колёс. Однако, к недостаткам всех видов обработки по этому методу относится требуемое оборудование. Существующие устаревшие станки требуют высокой квалификации оператора и сложны в настройке, тогда как современные станки характеризуются высокой стоимостью. Кроме того, режущий инструмент (долбяки, червячные фрезы, шеверы и др.) предполагает наличие специального оборудования для его изготовления, а также имеет повышенные требования к точности и качеству рабочих поверхностей, что увеличивает затраты на его производство.

Обработка по методу копирования может производиться на универсальном оборудовании благодаря более простым движениям формообразования, но при этом необходим специальный инструмент, точно передающий геометрию профиля впадины. Например, фрезерование модульными фрезами требует наличия отдельной фрезы под конкретное число зубьев при заданном модуле [18]. На практике часто используют комплекты фрез, применяемые для диапазонов числа зубьев. За счёт этого увеличивается погрешность профиля впадины и снижается точность зацепления в паре колёс. Шлифование профильными абразивными кругами, в особенности при широкой номенклатуре

изделий, требует частой правки кругов, а соответственно и наличия специального механизма для осуществления правки.

В рамках исследования рассматривается возможность обработки впадин цилиндрических зубчатых колёс внешнего зацепления непрофильным режущим ин-

Проведение эксперимента и его результаты

В качестве режущего инструмента предлагается использовать отрезные абразивные диски диаметрами 125...150 мм и толщиной 1 мм, применяемые на угловых шлифовальных машинах. Отрезные диски из-за своей малой, по сравнению со стандартными шлифовальными кругами, круги с толщиной до 4 мм не обладают высокой жёсткостью. Работа таким инструментом требует точности, поскольку приложение к торцу диска нагрузки больше допустимой заводом производителем может привести к его сколу, отлому или разрыву, что неизбежно влечёт за собой повышение травматизма и снижение точности обработки.

Однако, эти последствия в основном актуальны при выполнении операций вручную, где влияние человеческого фактора является значительным. При отсутствии достоверной статистики можно предположить, что использование такого инструмента на автоматизированном оборудовании с числовым программным управлением не будет иметь вышеуказанных последствий благодаря повышенной точности рабочих перемещений и базирования заготовки и режущего инструмента.

Предлагаемый метод обработки состоит из чернового и чистового этапа. На черновом этапе снимается основная масса припуска, на чистовом – достигаются необходимые требования точности и шероховатости обработанной поверхности. Поскольку торцевая нагрузка негативно сказывается на стойкости отрезного диска, необходимо использовать методику обработки периферией. Исходя из этого, для черновой обработки было предложено две схемы резания.

Для графического отображения предлагаемых схем формообразования обработанной поверхности использовалась библиотека «Валы и механические передачи»

струментом – отрезным абразивным кругом. Предполагается, что использование такого подхода может ускорить процесс обработки и снизить затраты, связанные с обеспечением производства режущим инструментом.

системы автоматизированного проектирования КОМПАС-3D. Этот программный продукт позволяет осуществлять построение зубчатых и червячных колёс различных типов с правильным профилем впадин путём задания исходных данных зубчатой передачи или её составляющих.

Первая стратегия (рис. 2) заключается в последовательном снятии припуска перемещением заготовки вдоль оси инструмента с некоторым заданным шагом. Заготовка подводится в исходное положение первого прохода, производится шлифование по всей высоте зубчатого колеса, т. е. по всей длине зуба. Затем осуществляется смещение заготовки в следующее положение и проход по длине зуба, и так далее для каждого следующего смещённого положения.

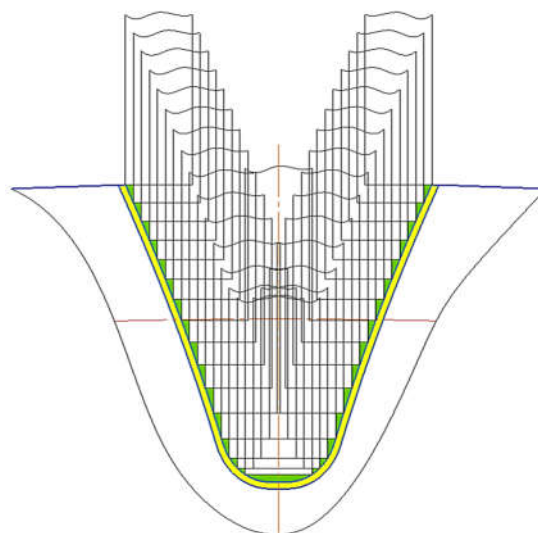


Рис. 2. Стратегия ступенчатого радиального врезания

Fig. 2. Stepped radial plunge strategy

Вторая стратегия (рис. 3) заключается в снятии припуска путём врезания в материал заготовки при таком положении круга, в котором поверхность его торца располагается касательно к боковой по-

верхности зуба. Заготовка поворачивается на определенный угол относительно оси впадины, смещается на определённое расстояние относительно торцевой поверхности диска и подводится к нему в исходное положение. Далее, аналогично первой стратегии, осуществляется снятие припуска вдоль всей высоты зуба. После этого выполняется обработка по касательной второй боковой поверхности.

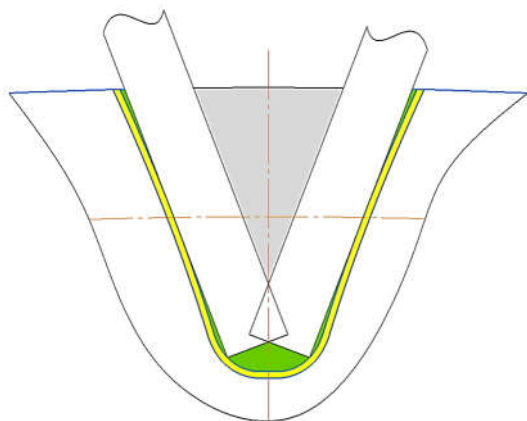


Рис. 3. Стратегия врезания касательно по эвольвенте
Fig. 3. Plunging strategy tangentially along the involute

В результате обработки по обеим стратегиям помимо изначально заложенного припуска на чистовую обработку имеет место остаточный припуск. Это вполне закономерно, поскольку непрофильный отрезной круг не может полностью воссоздать фасонную геометрию профиля впадины зубчатого колеса без его зарезания из-за накладываемого условия только периферийной обработки.

На рис. 2, 3 представлены схемы обработки впадины зубчатого колеса с выделением разных зон припуска. Жёлтым цветом обозначен припуск на чистовую обработку, зелёным – остаточный припуск. На рис. 3 серым цветом показана зона материала, не требующая дальнейшей обработки. При вертикальной установке заготовки эту массу материала не нужно сошлифовывать, потому как за счёт двух пересекающихся резов она удаляется за счёт собственного веса.

Для оценки эффективности предложенных схем формообразования процесса обработки был принят критерий площади остаточного припуска в торцевой плоскости зубчатого колеса. Путём графического моделирования в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D были определены значения остаточного припуска при реализации второй стратегии. Затем пробными построениями подбирался такой шаг смещения ступенчатой обработки, при котором площадь остаточного припуска будет того же порядка, что и при обработке касательно к боковым поверхностям зубьев.

В рамках исследования рассмотрены цилиндрические зубчатые колёса с модулем Экспериментальные данные (таблица) показывают, что с увеличением числа зубьев ба становится ближе к профилю зубчатой рейки, а кривизна его боковой поверхности уменьшается.

Таблица

Результаты анализа стратегий обработки

Table

Results of analyzing the processing strategies

Параметр		1 стратегия	2 стратегия
m = 2 мм, z = 90	Общая площадь припуска на черновую обработку, мм ²	12,382	
	Площадь остаточного припуска, мм ²	0,598	0,582
	% от общей площади	4,83	4,70
	Площадь необрабатываемого материала, мм ²	-	3,532
	% от общей площади	-	28,52
	Число резов	31 (шаг 0,12 мм)	2
m = 2 мм, z = 19	Общая площадь припуска на черновую обработку, мм ²	13,146	
	Площадь остаточного припуска, мм ²	1,163	1,189
	% от общей площади	8,85	9,04
	Площадь необрабатываемого материала, мм ²	-	3,679
	% от общей площади	-	27,99
	Число проходов	17 (шаг 0,27 мм)	2

Это приводит к снижению площади остаточного припуска при использовании второй стратегии, тогда как для первой стратегии требуется большее количество проходов с уменьшенным шагом смещения заготовки.

В случае, когда число зубьев приближается к минимальному значению второй стратегии уменьшается почти вдвое,

Выводы

В исследовании представлен обзор существующих методов формообразования эвольвентного профиля зубчатых колёс, а также показаны их основные ограничения в условиях мелкосерийного производства. Было выдвинуто предположение о возможности применения для обработки зубьев нестандартного режущего инструмента,

но остаётся значительно большим по сравнению с количеством операций при касательном врезании. При формообразовании по второй стратегии существенная часть припуска, растущая с увеличением модуля Это увеличивает стойкость режущего инструмента и сокращает время обработки впадины зубчатого колеса.

а именно отрезного абразивного диска, предназначенного для угловых шлифовальных машин. Были предложены стратегии обработки, которые возможно осуществить с учётом особенностей самого инструмента и непосредственно обрабатываемых поверхностей, определена эффективность предложенных стратегий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

нурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т : справочник / В. И. Анурьев ; под редакцией И. Н. Жестковой. 11-е изд., стереотип. Москва : Машиностроение, 2021. 2816 с. - ISBN 978-5-907104-86-0. - Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. - URL:

<https://e.lanbook.com/book/193015> (дата обращения: 05.05.2025). - Режим доступа: для авториз. пользователей.

иновский, А. В. Исследование способа изготовления зубчатых колес с применением электроэрозионной обработки / А. В. Линовский // European Scientific Conference : сборник статей победителей IV Международной научно-практической конференции : в 3 ч., Пенза, 07 июня 2017 года. Том Часть 2. Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г.Ю.), 2017. – С. 74-

ожевникова, А. А. Альтернативные методы изготовления зубчатого колеса планетарного редуктора с внутренним зацеплением / А. А. Кожевникова, А. А. Шведуненко // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 1(248). С. 19-23. – DOI

металлорежущие инструменты : учебник для вузов / Г. Н. Сахаров [и др.]. М. : Машиностроение, 328 с.

Пекарчук, О. О. Технология изготовления и ее влияние на эксплуатационные характеристики зубчатых колес / О. О. Пекарчук // Вестник РГА-ТА имени П. А. Соловьева. 2021. № 4(59). С. 90-95. – EDN VDWVDE.

Семенченко, И. И. Проектирование металлоре-

жущих инструментов /И. И. Семенченко, В. М. Матюшин, Г. Н. Сахаров. М. : Машгиз, 1963. 952 с.

Справочник инструментальщика / И. А. Ординарцев [и др.]; под общ.ред. И. А. Ординарцева. Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. 846 с.

Шеховцева, Е. В. Инновационный технологический процесс изготовления блока зубчатых колес газотурбинного двигателя / Е. В. Шеховцева // Труды МАИ. 2011. № 45. С. 29.

Механическая обработка зубчатых колес : учебное пособие / В. И. Жиганов, Ю. А. Сахно, В. В. Демидов, Е. Ю. Сахно. Ульяновск : УлГТУ, 134 с.

Формообразование конических зубчатых венцов с постоянным нормальным шагом колес передач с неэвольвентным зацеплением / А. Л. Мироненко, Н. В. Зубкова, Ю. Г. Гуцаленко [и др.] // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 3-7(59). С. 163-170.

Караваanova, А. Г. Выбор абразивного инструмента и режимов резания для повышения качества зубчатых колес и блоков шестерен / А. Г. Караваanova // Главный механик. 2023. № 9. С. 544-553. – DOI 10.33920/pro-2-2309-03.

Нахатакян, Ф. Г. Зависимость износа зубьев зубчатых колес от угла перекоса в зубчатых зацеплениях / Ф. Г. Нахатакян, Д. Ф. Нахатакян // Трение и износ. 2024. Т. 45, № 4. С. 335-342. –

ожевникова, А. А. Альтернативные методы изготовления зубчатого колеса планетарного редуктора с внутренним зацеплением / А. А. Кожевникова, А. А. Шведуненко // Известия Волго-

градского государственного технического университета. –2021. № 1(248). С. 19-23. – DOI

урушин, М. И. Параметрическая динамика дифференциального редуктора с одно- и двухпарными зацеплениями зубчатых колес / М. И. Курушин, В. Б. Балякин, В. Б. А. Оссиала // Вестник машиностроения. – 2020. № 3. С. 19-28. – DOI

овременные методы технологии формообразования крупномодульных зубчатых колес / А. А. Ключко, А. О. Скоркин, Е. В. Камчатная-Степанова [и др.] // Znanstvena Misel. 2020. № 48-1(48). – С. 25-29.

унцов, А. С. Геометрия внутреннего зацепления колес планетарной передачи, нарезанных не-

стандартным зубодолбежным инструментом / А. С. Сунцов, А. В. Овсянников, Е. Ф. Вычужанина // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 2. С. 24-30. – DOI 10.22213/2413-

еофанов, А. Н. Универсальный алгоритм CAD-моделирования некруглых зубчатых колес по функции передаточного отношения / А. Н. Феофанов, А. Н. Соболев, А. С. Белоцкий // Вестник МГТУ «Станкин». 2022. № 2(61). С. 28-31.

чаев, П. Н. К вопросу изготовления цилиндрических зубчатых колес лазером / П. Н. Учаев, М. В. Райник // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2013. № 1. С. 66-70.

REFER ENCES

1. Anuryev VI. Handbook of a mechanical engineering designer [Internet]. 11th ed. Moscow: Mashinostroenie; 2021 [cited 2025 May 05]. Available from: <https://e.lanbook.com/book/193015>
2. Linovsky AV. Investigation of the method of manufacturing gears using electroerosion treatment. Collection of Papers by Winners of the IV International Scientific and Practical Conference; Penza: Nauka I Prosveshchenie; 2017.
3. Kozhevnikova, AA, Shvedunenko AA. Alternative methods of manufacturing a gear wheel of a planetary gearbox with internal gearing. Izvestiya VSTU. 2021;1(248):19-23. DOI 10.35211/1990-5297-2021-1-248-19-23.
4. Sakharov GN. Metal-cutting tools: textbook for universities. Moscow: Mashinostroenie; 1989.
5. Pekarchuk OO. Manufacturing technology and its impact on the performance characteristics of gears. Vestnik RSATU. 2021;4(59):90-95.
6. Semenchenko II, Matyushin VM, Sakharov GN. Designing of metal-cutting tools. Moscow : Mashgiz; 1963.
7. Ordinartsev IA. Toolmaker's handbook. Leningrad: Mashinostroenie; 1987.
8. Shekhovtseva EV. Innovative technological process of manufacturing a block of gears of a gas turbine engine. Trudy MAI. 2011;45:29.
9. Zhiganov VI, Sakhno YuA, Demidov VV, Sakhno EYu. Mechanical treatment of gears: textbook. Ulyanovsk: UISTU; 2011.
10. Mironenko AL, Zubkova NV, Gutsalenko YuG. Shaping of conical gear rings with a constant normal pitch of gear wheels with non-involute gearing. Actual Scientific Research in the Modern World. 2020;3-7(59):163-170.
11. Karavanova AG. Choice of abrasive tools and cutting modes to improve the quality of gears and gear blocks. Chief Mechanical Engineer. 2023;9:544-553. DOI 10.33920/pro-2-2309-03
12. Nakhatkanyan FG, Nakhatkanyan DF. Dependence of tooth wear on the angle of misalignment in gears. Friction and Wear. 2024;45(4):335-342. DOI 10.32864/0202-4977-2024-45-4-335-342.
13. Kozhevnikova AA, Shvedunenko AA. Alternative methods of manufacturing a gear wheel of a planetary gearbox with internal gearing. Izvestiya VSTU. 2021;1(248):19-23. DOI 10.35211/1990-5297-2021-1-248-19-23.
14. Kurushin MI, Balyakin VB, Ossiala VBA. Parametric dynamics of a differential reducer with one- or two-pair gearing of wheels. Vestnik Mashinostroeniya. 2020;3:19-28. DOI 10.36652/0042-4633-2020-3-19-28.
15. Klochko AA, Skorkin AO, Kamchatnaya-Stepanova EV. Modern methods of forming technology for large-module gears. Znanstvena Misel. 202; 48-1(48):25-29.
16. Suntsov AS, Ovsyannikov AV, Vychuzhanina EF. Geometry of the internal engagement of planetary gear wheels cut with a non-standard tooth-cutting tool. Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikov. 2020; 23(2):24-30. DOI 10.22213/2413-1172-2020-2-24-30.
17. Feofanov AN, Sobolev AN, Belotsky AS. Universal algorithm of CAD modeling of non-circular gears according to the gear ratio function. Vestnik MSTU "Stankin". 2022;2(61):28-31.
18. Uchaev PN, Rainik MV. On the issue of manufacturing cylindrical gears with a laser. Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology. 2013;1:66-70.

Информация об авторах:

Кузьменко Андрей Алексеевич – студент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Машиностроительного факультета Омского государ-

ственного технического университета (ОмГТУ), тел.: 8-913-965-35-77.

Макашин Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металлообрабатывающие станки и инструменты» ФГБОУ ВПО «Ом-

ского государственного технического университета».

Kuzmenko Andrey Alekseevich – Student of the Department of Metal-cutting Machines and Tools, Faculty of Mechanical Engineering, Omsk State Technical University (OmSTU), phone: 8-913-965-35-77.

Makashin Dmitry Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal-Cutting Machines and Tools, Omsk State Technical University,

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 27.05.2025; одобрена после рецензирования 02.06.2025; принята к публикации 26.06.2025. Рецензент – Нагоркин М.Н. доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета.

The article was submitted to the editorial office on 27.05.2025; approved after review on 02.06.2025; accepted for publication on 26.06.2025. The reviewer is Nagorkin M.N., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University.



Продолжается подписка на научно-технический журнал
«Транспортное машиностроение» на 2025 год

Подписку на журнал можно оформить в любом почтовом отделении или непосредственно в редакции журнала. Подписные индексы по интернет-каталогу «Пресса по подписке» – Э80859 – и Объединенному каталогу «Пресса России» – 80859.

Стоимость подписки на минимальный срок – от 4846 руб.

Информация об опубликованных статьях регулярно направляется в систему Российского индексирования (РИНЦ) – <https://www.elibrary.ru/contents.asp?titleid=79505>.

Сайт электронной редакции журнала: <https://bstu.editorum.ru/ru/nauka/journal/169/view>

E-mail: trans-eng@tu-bryansk.ru.

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (категория К2) по группам научных специальностей:

- 2.5. Машиностроение (2.5.2; 2.5.3; 2.5.5; 2.5.6; 2.5.8),
- 2.6. Химические технологии, науки о материалах, металлургия (2.6.1; 2.6.17),
- 2.9. Транспортные системы (2.9.1; 2.9.3; 2.9.5).

Материаловедение
и технологии материалов
Materials science and materials technology

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 669; 621.791.13; 620.22

doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-27-34

КОМПОЗИЦИОННЫЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ
С ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИМ УПРОЧНЕНИЕМ
И РЕГУЛИРУЕМЫМ УРОВНЕМ СВОЙСТВ

Алексей Олегович Кривенков^{1✉}, Дмитрий Борисович Крюков², Максим Сергеевич Гуськов³, Антон Алексеевич Акимов⁴

^{1,2,3,4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ krivenkov80@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1614-2487>

² ddbbkk@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0393-9550>

³ Suralab@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4143-576X>

⁴ fanfcbn@mail.ru

Аннотация

Целью исследования является разработка композиционных металлических материалов с интерметаллическим упрочнением на основе сплавов алюминия и титана, сочетающих в себе требуемый уровень механических характеристик. Задачи, решению которых посвящена статья, заключаются в разработке способа создания пулестойкого композиционного материала, обеспечивающего возможность управления его структурой и уровнем свойств в широком диапазоне. В качестве методов исследования применялся математический расчет режимов сварки взрывом для получения композиционного материала на основе сплавов алюминия и титана, проведение термической обработки полученного композита и оценка механических свойств материала.

Новизна работы заключается в применении запатентованных технических решений, позволяющих создавать сваркой взрывом композиционные металлические пулестойкие материалы, включаю-

щих новые способы армирования и формирования упрочняющих интерметаллических слоев регулируемой толщины в структуре композита.

Результаты исследования показали, что данные материалы востребованы в России, и за рубежом; новые металлические пулестойкие материалы создаются; актуальным направлением в области создания пулестойких материалов является создание гетерогенных композиционных материалов. Получен композит, в структуре которого для исключения расслаивания твердых интерметаллидных слоёв при ударных нагрузках листы выполнялись перфорированными, что ограничит распространение трещин, сохраняя целостность материала при динамическом воздействии. Регулируя толщину и количество слоёв можно в широких пределах управлять свойствами, плотностью и пулестойкостью материала.

Ключевые слова: материал, сварка, армирование, интерметаллидные слои, сплав, композит.

Финансирование: исследования выполнены в рамках конкурса исследовательских проектов «Ректорские гранты» для обучающихся Пензенского государственного университета.

Ссылка для цитирования:

Кривенков А.О. Композиционный металлический материал с интерметаллическим упрочнением и регулируемым уровнем свойств / А.О. Кривенков, Д.Б. Крюков, М.С. Гуськов, А.А. Акимов // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 7. – С. 27-34. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-27-34.

Original article

Open Access Article

COMPOSITE METAL MATERIAL WITH INTERMETALLIC HARDENING AND ADJUSTABLE LEVEL OF PROPERTIES

Aleksey Olegovich Krivenkov^{1✉}, Dmitry Borisovich Kryukov², Maksim Sergeevich Guskov³, Anton Alekseevich Akimov⁴

^{1,2,3,4} Penza State University, Penza, Russia

¹ krivenkov80@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1614-2487>

² ddbbkk@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0393-9550>

³ Suralab@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4143-576X>

⁴ fanfcbn@mail.ru

Abstract

The study objective is to develop composite metal materials with intermetallic hardening based on aluminum and titanium alloys that combine the required level of mechanical characteristics. The tasks to which the paper is devoted are to develop a method for creating a bulletproof composite material that provides the ability to control its structure and level of properties over a wide range. The research methods used include mathematical calculation of explosion welding modes to obtain a composite material based on aluminum and titanium alloys, heat treatment of the resulting composite and evaluation of the mechanical properties of the material.

The novelty of the work is in the application of patented technical solutions that make it possible to create composite bulletproof metal materials by explosion welding, including new methods of reinforcement

and the formation of reinforcing intermetallic layers of adjustable thickness in the composite structure.

The study results show that these materials are in demand both in Russia and abroad; new bulletproof metal materials are being created; the current direction in the field of making bulletproof materials is the development of heterogeneous composite materials. A composite is obtained which structure contains perforated sheets in order to avoid delamination of solid intermetallic layers under shock loads. This will limit the spread of cracks, preserving the integrity of the material under dynamic impact. By adjusting the thickness and number of layers, the properties, density, and bullet resistance of the material can be widely controlled.

Keywords: material, welding, reinforcement, intermetallic layers, alloy, composite.

Funding: the study was carried out within Rector's Grants research project competition for students of Penza State University.

Reference for citing:

Krivenkov AO, Kryukov DB, Guskov MS, Akimov AA Composite metal material with intermetallic hardening and adjustable level of properties. Transport Engineering. 2025;7: 27-34. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-27-34.

Введение

В настоящее время в качестве легких бронематериалов широко используются сплавы на основе алюминия и титана. Главное их достоинство - низкая плотность. Благодаря этому конструкция на основе алюминиевого или титанового сплава, сохраняя свои функциональные и габаритные размеры, имеет меньший вес по сравнению с аналогичным изделием из конструкционной стали. Снижение веса может достигать до 25 % [2, 3]. Однако, монобронни имеют ряд недостатков. Основным недостатком алюминиевой брони является невозможность обеспечения сопоставимой со стальной броней противоснарядной стойкости. Титановые сплавы

из-за структурных особенностей, связанных с высокой степенью локализации титаном внешнего деформационного воздействия, в чистом виде в качестве броневых материалов ограничены к применению. Невозможность реализации высокой динамической твердости титаном связана с недостатком, который заключается в создании условий для сквозного пробития за счет сдвига комплексов атомов в структуре титана по плоскости скольжения. В настоящее время разработка и применение комбинированных (гетерогенных) броней на основе сплавов титана и алюминия является перспективной и актуальной задачей.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Исследованиями в области создания композиционных металлических материа-

лов на основе системы Ti-Al, используемых в качестве броневых, занимаются Рос-

сийские и зарубежные компании: НИИ «Стали» (Россия), Explomet (Польша) [4], College of Mechanical and Electrical Engineering (Harbin Engineering University, Harbin, Китай) [5] и др. Однако, разработанные ими многослойные материалы обладают следующими недостатками: отсутствует связь между металлическими слоями высокопрочной основы композита (Ti), которые разделены послойно менее прочными слоями (Al); в точке контакта композита с баллистическим объектом происходит полное расслоение композиции и потеря конструкционной целостности броневых материалов; распространение хрупких трещин носит обширный характер относительно места динамического воздействия на материал, а развитие трещины после того, как она возникла, происходит самопроизвольно без дальнейшего увеличения приложенного напряжения; в структуре композита отсутствуют упрочняющие интерметаллические слои.

Решением данной задачи может стать создание композита нового типа, в структуре которого в определенной последовательности чередуются вязкие металлические и твердые упрочняющие интерметаллические слои. Модель разработанного гетерогенного материала приведена на рис. 1.

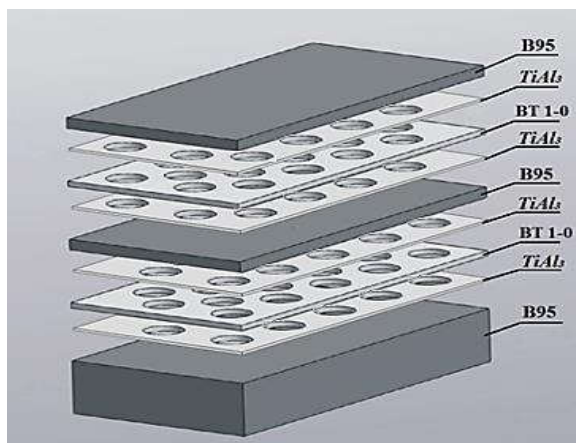


Рис. 1. Модель разработанного композиционного материала на основе титанового и алюминиевого сплавов

Fig. 1. Model of the developed composite material based on titanium and aluminum alloys

Особенностью структуры разработанного композита является то, что в ар-

мирующих титановых листах в определенном порядке выполнены перфорации, которые обеспечивают связь слоев алюминиевой матрицы композита. Расположение армирующих слоев в структуре композита выполняться таким образом, чтобы перфорации в первом армирующем слое располагались в шахматном порядке и не накладывались одна на другую относительно последующих армирующих слоев. Упрочнение композиционного материала достигается как за счет наличия в схеме армирования перфораций, обеспечивающих высокопрочное соединение матрицы, так и за счет формирования в его структуре на границах матрицы и перфорированного армирующего элемента интерметаллических высокотвердых слоев на основе $TiAl_3$ регулируемой толщины последующей комплексной термической обработкой. Интерметаллид $TiAl_3$ имеет низкую плотность $3,4 \text{ г/см}^3$, высокую микротвердость $465...670 \text{ кг/мм}^2$. В основе предлагаемого решения лежит запатентованный авторами разработки способ получения композиционного материала сваркой взрывом [6].

При создании композиционного материала были учтены показатели механических и эксплуатационных свойств материалов его составляющих. В качестве основы металлической матрицы композита использовали отожженный высокопрочный алюминиевый сплав марки В95, используемый, в том числе и в качестве броневых. На основе сплава В95 изготавливается целая линейка военной техники легкого класса бронирования, от бронемашин пехоты до катеров и боевых роботов.

В качестве армирующих листов композита использовали титановый сплав марки ВТ1-0. Изготовленный на его основе прокат имеет небольшую плотность и высокую пластичность. Эти свойства позволяют получать изделия требуемой формы.

Для создания экспериментальных образцов композиционного материала были выбраны материалы, марка и размер которых приведены в табл. 1.

Разработанный композит представляет собой металлический многослойный материал следующего состава: В95 + ВТ1-0 + В95 + ВТ1-0 + В95. Сварку взрывом

осуществляли с использованием рациональных технологических параметров ударно-волнового нагружения с учетом

состава, свойств и толщины отдельных элементов композита, которые приведены в табл. 2.

Таблица 1

Марка материалов и размеры заготовок

Table 1

Material brands and dimensions of workpieces

Материал композита	Размеры заготовок, мм
B95 + BT1-0 + B95 + BT1-0 + B95	габаритные размеры 500×300 толщина слоев: 1,8; 1; 1,8; 1; 6

Таблица 2

Рациональные технологические параметры сварки взрывом разработанного композита

Table 2

Rational technological parameters of explosion welding of the developed composite

Исходные режимы сварки взрывом							Расчетные режимы сварки взрывом				
Характеристики взрывчатого вещества			Зазор между листами композита k, мм				Скорость точки контакта свариваемых листов V _к , м/с	Скорость соударения свариваемых листов V _с , м/с			
Скорость детонации D _{вв} , м/с	Высота H _{вв} , мм	Плотность ρ _{вв} , г/см ³						1-2	2-3	3-4	4-5
2900	41	0,75	2	2	2	2	2900	520 - 530	550 - 560	530 - 540	480 - 490

На заключительной стадии, для формирования требуемого комплекса свойств композита, в его структуре посредством комплексной упрочняющей термической

обработки формировали твердые интерметаллические слои на основе TiAl₃, обеспечивающие эффективное снижение энергии и разрушение баллистического объекта.

Результаты

Получены экспериментальные образцы композиционного материала состава B95 + BT1-0 + B95 + BT1-0 + B95. Фотография экспериментального образца после операции гидроабразивной резки представлена на рис. 2.

Наличие армирующих титановых листов в составе композита не оказывают существенного влияния на прочностные свойства материала. В качестве основных операций термической обработки для упрочнения композиционного материала использовали отжиг на интерметаллид, закалку и искусственное старение. Механизм

формирования упрочняющих фаз подробно описан в работах [7–10].

В результате проведенных исследований определены рациональные режимы термообработки обеспечивающего формирование слоев интерметаллида по границам армирующих титановых листов толщиной до 250 мкм на сторону. Упрочняющая термическая обработка обеспечивает значительное повышение прочностных характеристик разработанного гетерогенного материала [11–13].

Исследования механических характеристик композита после сварки взрывом и полного цикла упрочняющей термиче-

ской обработки включали оценку твердости, предела прочности, предела текучести и относительного удлинения материала. Оценка твердости (микротвердости HV) выполняли на подготовленных микрошлифах с использованием стационарного твердомера ПМТ-3 по методике ГОСТ 9450-76 с нагрузкой на инденторе 200 гр. (HV_{0.2}). Оценка предела прочности, предела текучести и относительного удлинения материала выполняли на подготовленных образцах методом статического одноосного нагружения по ГОСТ 1497-84 при нормальной температуре на разрывной машине ИР 5145-500.

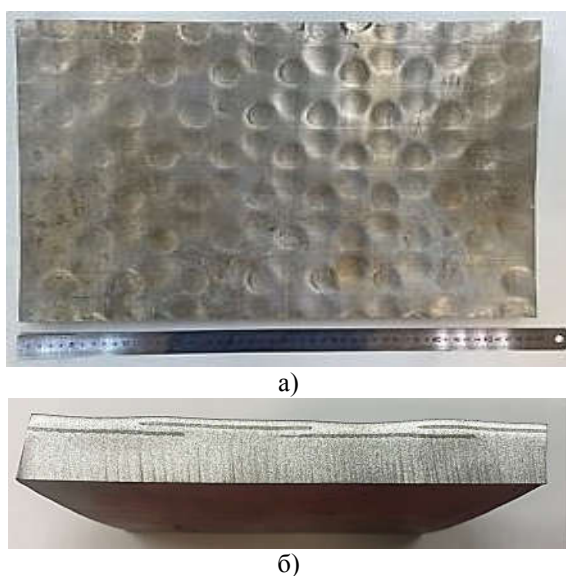


Рис. 2. Фотографии экспериментального образца композиционного металлического материала после сварки взрывом и гидроабразивной резки: а – внешний вид композита; б – поперечный срез композита в плоскости перфораций в армирующих слоях

Fig. 2. Photos of an experimental sample of composite metal material after explosive welding and waterjet cutting: a) external appearance of composite; b) cross-section of composite in the plane of perforations in reinforcing layers

Результаты исследования твердости металлических слоев композита представлены на рисунке 3. Исследования установили, что твердость алюминиевого сплава В95 (замеры в точках №1 и №5) составила 140-145 HV, твердость титанового сплава ВТ 1-0 (замер в точке №3) – 156...158 HV. Следовательно, термообработка оказала незначительное влияние на изменение твердости металлических слоев композита.

Значение твердости в слое зарождающегося интерметаллида на границе с металлом матрицы (замер в точке №2) составило 296-302 HV, а в сплошном слое сформировавшегося интерметаллида (замер в точке №4) – 552...556 HV. Следовательно, в результате термообработки композиционного материала, на границе раздела металлов формируется высокотвердый интерметаллидный слой, твердость которого превышает твердость металлических слоев композита в 3,5...3,8 раза.

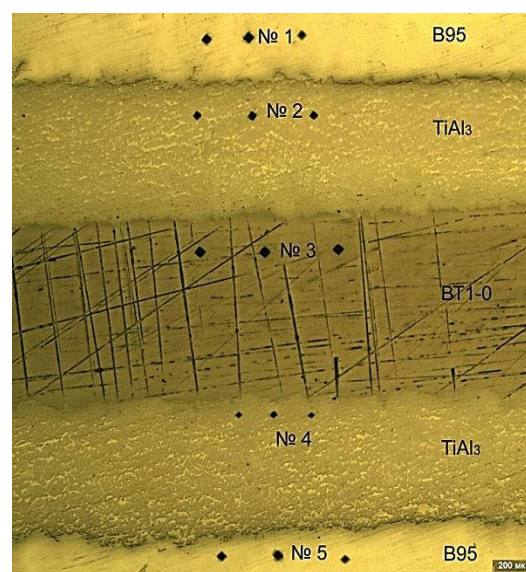


Рис. 3. Фото микрошлифа при оценке твердости слоев композита

Fig. 3. Photo of a microsection when assessing the hardness of composite layers

Для испытаний композита на статическое одноосное нагружение изготавливали образцы в соответствии с требованиями нормативно-технической документации, контроль геометрических параметров образцов до и после разрыва контролировали с точностью 0,1 мм. Образцы для испытаний изготавливались таким образом, чтобы сохранить целостность перфораций в армирующих слоях композита и обеспечить расположение перфораций по направлению прикладываемой к образцу нагрузки. Образец для испытаний композита на статическое одноосное нагружение представлен на рис. 4.

Результаты испытаний экспериментальных образцов композиционных материалов на статическое одноосное нагружение приведены в табл. 3.

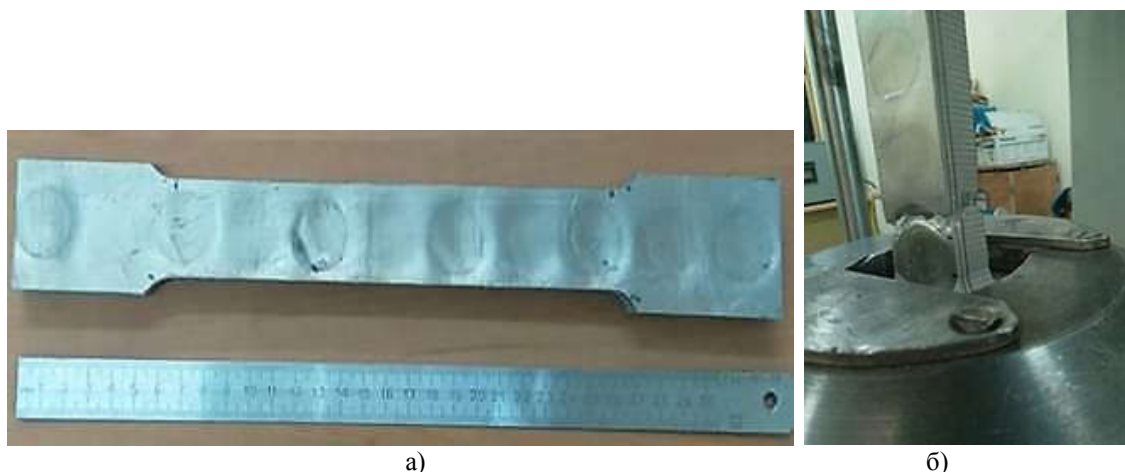


Рис. 4. Фотография образцов композита для оценки прочностных характеристик и пластичности: а - до испытания; б - после испытания
Fig. 4. Photo of composite samples for evaluation of strength characteristics and plasticity: a) before the test; b) after the test

Таблица 3

Результаты испытаний на статическое одноосное нагружение

Table 3

Results of static uniaxial loading tests

Композиционный материал: B95 + BT1-0 + B95 + BT1-0 + B95	Механические свойства		
	σ_b , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %
Состояние после сварки взрывом	280 - 290	220 - 228	7 - 8
Состояние после сварки взрывом и рекристаллизационного отжига (разупрочнение материала для формообразования)	255 - 265	195 - 210	10 - 11
Состояние после сварки взрывом и после полного цикла упрочняющей термообработки	780 - 810	620 - 648	≥ 6

Таким образом, в результате проведенных исследований был получен композиционный металлический материал на основе сплавов алюминия и титана, определены рациональные параметры упрочняющей термической обработки, включающей отжиг на интерметаллид, закалку и старение. Упрочняющая термообработка обеспечила значительное повышение прочностных характеристик композита до 3...3,3 раз, за счет упрочнения матрицы композита (сплава B95) и формирования на границе раздела исходных материалов высокотвердой интерметаллической про-

слойки (TiAl_3) регулируемой толщины. Разработки позволят в широком диапазоне управлять структурой, плотностью и свойствами композита, что позволит регулировать уровень пулестойкости разработанного материала, применять его в качестве бронезащиты и создавать перспективные виды легких броней гражданского, коммерческого и военного назначения. Для оценки уровня пулестойкости, осколочной стойкости разработанных композиционных материалов необходимо проведение дополнительных исследований.

Зак л ю ч е н и е

1. В настоящее время перспективным направлением повышения баллистических характеристик броневых материалов является создание гетерогенных структур. В этой связи, разработка композиционного гетерогенного материала на основе

сплавов алюминия и титана с требуемым комплексом механических свойств, является актуальной задачей;

2. Получены экспериментальные образцы композиционного материала состава

В95 + ВТ1-0 + В95 + ВТ1-0 + В95 на рациональных режимах сваркой взрывом;

3. Определены виды и рациональные параметры упрочняющей термической обработки, обеспечивающей формирование твердого интерметаллида $TiAl_3$ регулируемой толщины в структуре композита для повышения прочностных характеристик материала;

4. Выполнен комплекс исследований механических свойств экспериментальных

образцов разработанного композита, в результате которого установлено существенное увеличение прочностных характеристик материала до 3...3,3 раз по сравнению с исходными материалами;

5. Установлена возможность управлять структурой, плотностью и свойствами композита, что позволит регулировать уровень пулестойкости разработанного материала и применять его в качестве бронезащиты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д. Сварка взрывом / Под ред. В. М. Кудинова. М.: Машиностроение, 1987. 216 с.
2. Федосеев С. Алюминиевая броня БМД // Техника и вооружение. 2006. № 11. С. 23-24.
3. Чернышов, Е. А. Развитие материалов для баллистической защиты на основе алюминиевых сплавов / Е. А. Чернышов, А. Д. Романов, Е. А. Романова // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 10. С. 43-47.
4. Walk Z, Koslik P, Galka A. Protective multilayer AlTi material with enhanced ballistic resistance. Coimbra, Portugal, NOKTURN 2016, June 20-24 2016. P. 209.
5. Cao Y, Zhu S, Guo C, Vecchio KS, Jiang F. Numerical investigation of the ballistic performance of metal- intermetallic laminate composites. Applied Composite Materials. 2015; 22(4): 437– 456.
6. Патент № 2606134 Российская Федерация, МПК В23К 20/08 (2006.01), В32В 7/04 (2006.01). Способ получения композиционного материала: №2015134788: заявл. 18.08.2015: опубл. 10.01.2017 / Первухин Л.Б., Казанцев С.Н., Крюков Д.Б., Чугунов С.Н., Кривенков А.О., Розен А.Е.; заявитель ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет». – 6 с.
7. Особенности фазовых превращений при термической обработке в композиционных материалах, полученных высокоэнергетическими методами воздействия / Д. Б. Крюков, А. О. Кривенков, С. Н. Чугунов [и др.] // Экологическая безопасность регионов России и риск от техногенных аварий и катастроф: Сборник статей XV Международной научно-практической конференции, Пенза, 30 апреля 2015 года / Под редакцией Ю. П. Перелыгина. Том Выпуск XV. –

- Пенза: Автономная некоммерческая научно-образовательная организация «Приволжский Дом знаний», 2015. – С. 60-64.
8. Первухин Л.Б., Розен А.Е., Кривенков А.О. [и др.]. Металлические композиционные материалы, армированные интерметаллическими упрочняющими элементами // Metal composite materials reinforced by intermetallic reinforcing members. Металлург. 2015. №10. С. 74-77.
 9. Первухин Л.Б., Крюков Д.Б., Кривенков А.О., Чугунов С.Н. Разработка новых схем армирования композиционных материалов на основе интерметаллического упрочнения. Металлург. 2016. №7. С. 85-87.
 10. Амир Хусейн Ассари. Микроструктура и кинетика формирования интерметаллической фазы в условиях твердофазной диффузионной сварки в биметаллическом Ti/Al композите / Амир Хусейн Ассари, Бейаталла Эгхбали // Физика металлов и металловедение. – 2019. – Т. 120, № 3. – С. 280-290.
 11. Первухин Л. Б., Крюков Д. Б., Кривенков А. О. [и др.]. Структурные превращения и свойства композиционного материала титан-алюминий при термической обработке. Физика металлов и металловедение. 2017. Т. 118. № 8. С. 801-805.
 12. Гуськов М.С., Хорин А.В., Кривенков А.О. [и др.]. Влияние схемы армирования на прочность композиционного материала, полученного сваркой взрывом. Транспортное машиностроение. 2024. № 11 (35). С. 71-78.
 13. Розен А.Е., Кривенков А.О., Крюков Д.Б. [и др.]. Способы получения композиционных материалов методами высокоэнергетического воздействия: монография. Пенза: Изд - во ПГУ, 2016 г. 138 с. ISBN 978-5-906913-5.

REFERENCES

1. Konon YuA, Pervukhin LB, Chudnovsky AD. Explosion welding. Moscow: Mashinostroyeniye; 1987.
2. Fedoseev S. BMD aluminum armor. Tekhnika I Vooruzhenie. 2006;11:23-24.
3. Chernyshov EA, Romanov AD, Romanova EA. Development of materials for ballistic protection

- based on aluminum alloys. Blanking Production in Mechanical Engineering. 2015;10:43-47.
4. Walk Z, Koslik P, Galka A. Protective multilayer AlTi material with enhanced ballistic resistance. NOKTURN 2016, June 20-24 2016; Coimbra, Portugal. p. 209.

5. Cao Y, Zhu S, Guo C, Vecchio KS, Jiang F. Numerical investigation of the ballistic performance of metal- intermetallic laminate composites. *Applied Composite Materials*. 2015; 22(4): 437– 456.
6. Pervukhin LB, Kazantsev SN, Kryukov DB, Chugunov SN, Krivenkov AO, Rosen AE. RF Patent No. 2606134. МПК B23K 20/08 (2006.01), B32B 7/04 (2006.01). Method of obtaining composite material. 2017 Jan 10.
7. Kryukov DB, Krivenkov AO, Chugunov SN. Features of phase transformations during thermal treatment in composite materials obtained by high-energy exposure methods. *Collection of Papers of the XV International Scientific and Practical Conference, April 30, 2015: Environmental Safety of Russian Regions and the Risk from Man-made Accidents and Catastrophes*; Penza: Volga House of Knowledge; 2015.
8. Pervukhin LB, Rosen AE, Krivenkov AO. Metal composite materials reinforced by intermetallic reinforcing members. *Metallurgist*. 2015;10:74-77.
9. Pervukhin LB, Kryukov DB, Krivenkov AO, Chugunov SN. Development of new reinforcement schemes for composite materials based on intermetallic hardening. *Metallurgist*. 2016;7:85-87.
10. Assari AH, Eghbali B. Microstructure and kinetics of intermetallic phase formation under conditions of solid-phase diffusion welding in a bimetallic Ti/Al composite. *Physics of Metals and Metallography*. 2019;120(3):280-290.
11. Pervukhin LB, Kryukov DB, Krivenkov AO. Structural transformations and properties of titanium-aluminum composite material during heat treatment. *Physics of Metals and Metallography*. 2017;118(8):801-805.
12. Guskov MS, Khorin AV, Batrashov VM, Kryukov DB, Krivenkov AO, Khomenko AS, Fedyashov AS. The effect of reinforcement scheme on the strength of a composite obtained by explosion welding. *Transport Engineering*. 2024;11:71-78.
13. Rosen AE, Krivenkov AO, Kryukov DB. Methods of obtaining composite materials by high-energy exposure: monograph. Penza: PSU Publishing House; 2016.

Информация об авторах:

Кривенков Алексей Олегович – кандидат технических наук, доцент, доцент. каф. СЛПИМ Пензенского государственного университета, тел. 89053652342.

Крюков Дмитрий Борисович – кандидат технических наук, доцент, доцент. каф. СЛПИМ Пензенского государственного университета, тел. 89033249734.

Krivenkov Aleksey Olegovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding, Foundry and Materials Science at Penza State University; phone: 89053652342.

Kryukov Dmitry Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding, Foundry and Materials Science at Penza State University; phone: 89033249734.

Гуськов Максим Сергеевич – кандидат технических наук, доцент каф. КиИМ Пензенского государственного университета, тел. 89603294929.

Акимов Антон Алексеевич – студент каф. СЛПИМ Пензенского государственного университета, тел: 89272874507.

Guskov Maksim Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Control and Testing of Materials at Penza State University; phone: 89603294929.

Akimov Anton Alekseevich – Student of the Department of Welding, Foundry and Materials Science at Penza State University; phone: 89272874507.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 11.04.2025; одобрена после рецензирования 15.05.2025; принята к публикации 26.06.2025. Рецензент – Макаренко К.В., доктор технических наук, профессор Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 11.04.2025; approved after review on 15.05.2025; accepted for publication on 26.06.2025. The reviewer is Makarenko K.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Material Science at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 669; 621.791.13; 620.22

doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-35-45

РАЗРАБОТКА НОВОГО ТИПА ГЕТЕРОГЕННОГО БРОНЕВОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И ТИТАНА, ПОЛУЧЕННОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ СВАРКИ ВЗРЫВОМ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО СВОЙСТВ

Дмитрий Борисович Крюков^{1✉}, Алексей Олегович Кривенков², Максим Сергеевич Гуськов³, Антон Алексеевич Акимов⁴

^{1,2,3,4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ ddbbkk@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0393-9550>

² krivenkov80@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1614-2487>

³ Suralab@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4143-576X>

⁴ fanfcban@mail.ru

Аннотация

Основной целью исследования является получение нового типа гетерогенного броневых материала на основе алюминия и титана сваркой взрывом, обладающего повышенными тактико-техническими характеристиками по сравнению с монометаллическими броневыми материалами. Задачи, решению которых посвящена статья, заключаются в разработке технологии создания указанного композиционного материала и изучению его основных физико-механических свойств. В качестве методов исследования применялся сравнительный анализ на этапе определения актуальности работы, математический расчет параметров сварки взрывом для получения композита, оценка макроструктуры материала, оценка количественного химического состава металлической основы композита и его околосварочной зоны, оценка пулестойкости. Новизна работы заключается в применении новой схемы армирования, благодаря которой повышает-

ся комплекс свойств броневых материала по сравнению с монометаллическими бронями. Результаты исследования показали, что разрабатываемые материалы востребованы как в России, так и за рубежом; наилучшую эффективность на сегодняшний день показывают сложные гетерогенные броневые структуры на основе алюминия; наиболее актуальным способом создания композиционного материала является сварка взрывом. Получен гетерогенный броневой материал, который позволяет снизить вес бронированной техники на 20...25 % при условии сохранения заданного уровня пулестойкости в сравнении с монометаллической алюминиевой броней.

Ключевые слова: материал, сварка, микроструктура, интерметаллид, пулестойкость, исследование.

Ссылка для цитирования:

Крюков Д.Б. Разработка нового типа гетерогенного броневых материала на основе алюминия и титана, полученного с применением сварки взрывом и исследование его свойств / Д.Б. Крюков, А.О. Кривенков, М.С. Гуськов, А.А. Акимов // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 7. – С. 35-45. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-35-45.

Original article

Open Access Article

DEVELOPMENT OF A NEW TYPE OF HETEROGENEOUS ARMOR ALUMINUM AND TITANIUM-BASED MATERIAL OBTAINED USING EXPLOSION WELDING AND STUDY OF ITS PROPERTIES

Dmitry Borisovich Kryukov^{1✉}, Aleksey Olegovich Krivenkov², Maksim Sergeevich Guskov³, Anton Alekseevich Akimov⁴

^{1,2,3,4} Penza State University, Penza, Russia

¹ ddbbkk@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0393-9550>

² krivenkov80@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1614-2487>

³ Suralab@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4143-576X>

⁴ fanfcban@mail.ru

Abstract

The study objective is to obtain a new type of heterogeneous armor material based on aluminum and titanium by explosion welding, which has improved tactical and technical characteristics compared to monometallic armor materials. The paper tasks are to develop a technology for making the specified composite material and to study its basic physical and mechanical properties. The research methods used are comparative analysis at the stage of determining the efficiency of work, mathematical calculation of explosion welding parameters to obtain the composite, assessment of the macrostructure of the material, assessment of the quantitative chemical composition of the composite metal base and its edge zone, and assessment of its bullet resistance. The novelty of the work is in the application

of a new reinforcement scheme, which increases the complex of properties of armored material compared to monometallic armor. The study results show that the materials developed are in demand both in Russia and abroad; complex heterogeneous aluminum-based armor structures currently show the best efficiency; explosion welding is the most relevant way to create a composite material. The heterogeneous armor material is obtained, which makes it possible to reduce the weight of armored vehicles by 20...25 %, provided that the specified level of bullet resistance is maintained in comparison with monometallic aluminum armor.

Keywords: material, welding, microstructure, intermetallic compound, bulletproof property, research.

Reference for citing:

Kryukov DB, Krivenkov AO, Guskov MS, Akimov AA Development of a new type of heterogeneous armor aluminum and titanium-based material obtained using explosion welding and study of its properties. Transport Engineering. 2025;7:35-45. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-35-45.

Введение

В последние десятилетия алюминиевая броня стала одним из важнейших материалов в защите боевых машин, обеспечивая высокий уровень безопасности при относительно небольшом весе. Ее ключевое преимущество перед традиционной стальной броней заключается в лучшей стойкости к бронебойным пулям, включая боеприпасы малого и крупного калибра. Кроме того, алюминиевые сплавы обладают высокой технологичностью: они легко поддаются обработке, хорошо свариваются и обеспечивают эффективную противоминную и противоосколочную защиту. Первые шаги в применении алюминия для бронирования были сделаны в США, где разработали специальные сплавы и создали первый бронетранспортер с корпусом из этого материала [1]. Вслед за ними другие страны, включая Россию, Великобританию и Францию, начали разрабатывать собственные алюминиевые бронеконструкции для военной техники. С появлением специализированных сплавов системы Al-Zn-Mg возможности алюминиевой брони значительно возросли. Эти материалы сочетают высокую прочность и пластичность, что делает их востребованными в производстве авиации, танков, бронетранспортеров, боевых роботов, беспилотников и других видов вооружений.

Благодаря низкой плотности алюминиевых сплавов конструкции на их основе, сохраняя свои функциональные и габаритные размеры, имеют меньший вес по сравнению с аналогичным изделием из конструкционной стали. Такое снижение веса может использоваться для улучшения тактико-технических характеристик бронемашин и средств индивидуальной защиты, для повышения пуле и бронестойкости, увеличения степени защиты экипажа, повышения объема полезной нагрузки и степени вооруженности [2].

Алюминиевые брони хорошо зарекомендовали себя в условиях малых и больших углов обстрела. При малом угле обстрела (менее 40°) алюминиевые сплавы эффективно поглощают энергию баллистического объекта, исключая сквозное пробитие бронеконструкции. При большом угле обстрела (свыше 40°) баллистический объект ricoшетирует от поверхности изделия, не нарушая целостности брони. Однако не смотря на все указанные выше преимущества основным недостатком алюминиевой брони является невозможность обеспечения сопоставимой со стальной броней противоснарядной стойкости, вследствие чего тяжелая бронированная техника изготавливается по-прежнему на основе стальных моно и многослойных броней.

Другими широко применяемыми бронематериалами являются сплавы на основе титана. Оценка их пулестойкости различными средствами поражения показывает перспективность их использования как для изготовления средств индивидуальной защиты, так и для легкобронированной техники. Общее снижение веса конструкции на их основе по сравнению со стальной может достигать от 10 до 25 %. Однако, ввиду определенных структурных особенностей, связанных с высокой степе-

нью локализации титаном внешнего деформационного воздействия, в чистом виде, в качестве броневых материалов с высокой степенью пулестойкости титановые сплавы ограничены к применению. Невозможность реализации высокой динамической твердости титаном связана с эффектом «среза пробки», который заключается в создании условий для сквозного пробития за счет сдвига комплексов атомов в структуре титана по плоскости скольжения [3].

Материалы и методы

На сегодняшний день наиболее перспективным является применение комбинированных (гетерогенных) броней на основе сплавов титана и алюминия, сочетающих в себе весь комплекс преимуществ вышеуказанных сплавов. На кафедре «Сварочное, литейное производство и материаловедение» Пензенского государственного университета разработан новый тип композиционных броневых материалов на основе высокопрочного алюминиевого сплава [4–6]. В качестве основы композита предложено использовать броневый алюминиевый сплав марки В95, являющийся одним из наиболее прочных легких конструкционных сплавов, используемых

в том числе и в качестве броневых. На основе сплава В95 изготавливается широкая линейка военной техники легкого класса бронирования, от бронемашин пехоты до катеров и боевых роботов.

В качестве армирующих листов композита было предложено использование титанового сплава марки ВТ1-0. Титановый сплав ВТ1-0 отличается легкостью и жаропрочностью. Изготовленный на его основе прокат имеет небольшую плотность и высокую пластичность. Эти свойства позволяют получать из него изделия любой геометрической формы путем последующего технологического передела.

Результаты

В армирующих титановых листах предварительно изготавливают перфорации диаметром 25 мм с целью обеспечения процесса формирования через них соединения между слоями металлической алюминиевой основы матрицы композита.

Схема сборки пакета композиционного материала перед сваркой взрывом приведена на рис. 1.

Общее количество слоев броневых композиционных материала составляет 5 и более, при этом промежуточные 2-ой и 4-ый армирующие слои располагают таким образом, чтобы отверстия в них перекрывали друг друга, исключая возможное сквозное прохождение через них баллистического объекта [7].

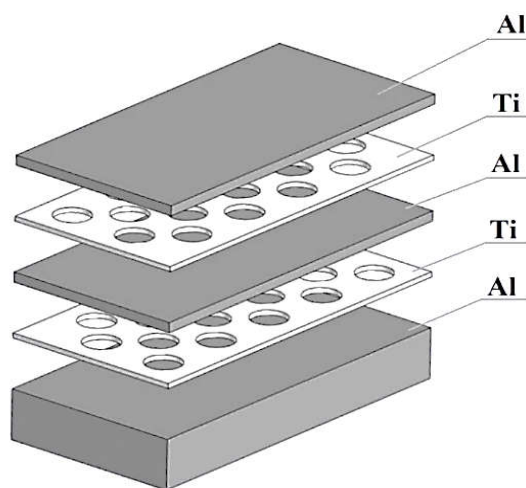


Рис. 1. Схема сборки пакета композиционного материала перед сваркой взрывом
Fig. 1. Assembly diagram of a composite material package before explosion welding

При получении гетерогенных композиционных материалов на основе сплавов алюминия и титана традиционными способами (пакетная прокатка, диффузионная сварка и др.) возникают сложности с обеспечением прочного соединения между исходными материалами из-за их различия в физико-химических и физико-механических свойствах, например, высокой твёрдости и прочности одного материала и высокой пластичности при низкой плотности другого. В этой связи авторами

было предложено в качестве способа получения композиционного материала использовать технологию сварки материалов взрывом, не имеющую вышеуказанных ограничений [8–10].

На основе анализа технологических схем получения сваркой взрывом композиционных металлических материалов для изготовления композиционного материала было предложено использование плоскопараллельной схемы сварки взрывом, представленной на рис. 2.

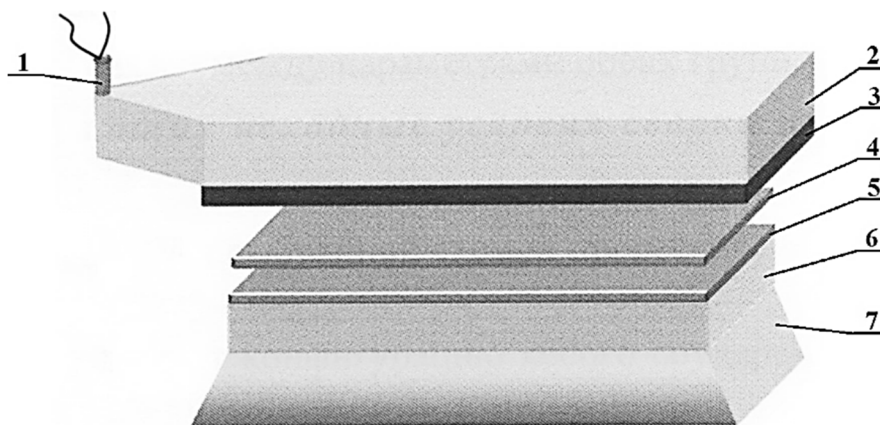


Рис. 2. Схема сварки композиционного материала взрывом:
1 – электродетонатор, 2 – контейнер с взрывчатым веществом,
3 – метаемая пластина, 4 – промежуточная пластина, 5 – неподвижная пластина, 6 – металлическое основание, 7 – грунт

Fig. 2. Explosion welding scheme of composite material:
1 – electric detonator, 2 – explosive container, 3 – throwable plate,
4 – intermediate plate, 5 – fixed plate, 6 – metal base, 7 – ground

Сварку взрывом производили с использованием взрывчатого вещества марки «Игданит» представляющего собой смесь аммиачной селитры с дизельным топливом. На основе анализа состояния композиционного материала после сварки взрывом посредством визуально-измерительного контроля, а также результатов ультразвукового исследования материала был определен рациональный диапазон технологических параметров ударно-волнового нагружения, обеспечивающий получение качественного композита.

Дальнейший спектр исследований композиционного материала был направлен на изучение его микроструктуры. В ходе исследования было показано, что сваренный на рациональном режиме композиционный материал имеет преимущественно безволновой характер зоны соеди-

нения слоев с отсутствием непроваров и интерметаллических включений. Макрошлиф композиционного армированного материала после сварки взрывом представлен на рис. 3.



Рис. 3. Макрошлиф композиционного материала

Fig. 3. Macro-graph of composite material

Выбор композиции сплавов алюминия и титана для изготовления броневго материала был обусловлен также тем обстоятельством, что на заключительной стадии формирования комплекса свойств композита в структуре материала термической обработкой формируются высокопрочные интерметаллические слои, которые выполняют роль дробящих баллистический объект преград.

Анализ литературных данных и диаграммы состояний бинарной системы Ti–Al показал, что основным типом интерметаллида, возникающим при взаимной термодиффузии в зоне контакта алюминия и титана является $TiAl_3$ [11].

Интерметаллид $TiAl_3$ имеет самую низкую плотность $3,4 \text{ г/см}^3$, высокую микротвердость $465...670 \text{ кг/мм}^2$.

Полный цикл термической обработки броневго композиционного материала заключается в отжиге на интерметаллид путем нагрева от 550 до $625 \text{ }^\circ\text{C}$ с последующей выдержкой в печи от 6 до 300 часов. Далее следует закалка образцов при температуре от 460 до $470 \text{ }^\circ\text{C}$, с последующим охлаждением в воде, подогретой до $100 \text{ }^\circ\text{C}$. После проводится искусственное старение образцов при температуре $110 \text{ }^\circ\text{C}$ с выдержкой в печи в течении 10 -ти часов, с последующим охлаждением в печи. Ряд

параметров режима старения композита является предметом ноу-хау и не приводится в данной статье.

Слои интерметаллида формируются в результате термодиффузионных процессов на границах сваренных слоев композита, при этом скорость роста и толщина интерметаллических прослоек регулируется величиной температуры отжига и временем выдержки материала в печи. Исследование диффузионных процессов на различных температурах позволило определить зависимость скорости роста интерметаллида. Анализируя полученные результаты можно сделать вывод о том, что максимальная толщина прослойки интерметаллида порядка $90...100 \text{ мкм}$ может быть получена при условии выдержки композита в печи с температурой $625 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 300 часов. Однако дальнейшая выдержка в печи не показывает существенного увеличения толщины слоя интерметаллида, что свидетельствует о существенном замедлении термодиффузионных процессов.

Исследование химического состава прослоек интерметаллида методом рентгенофазового анализа позволило идентифицировать их как соединение $TiAl_3$ [12].

Фазовый состав композита в зависимости от времени выдержки в печи приведен на рис. 4.

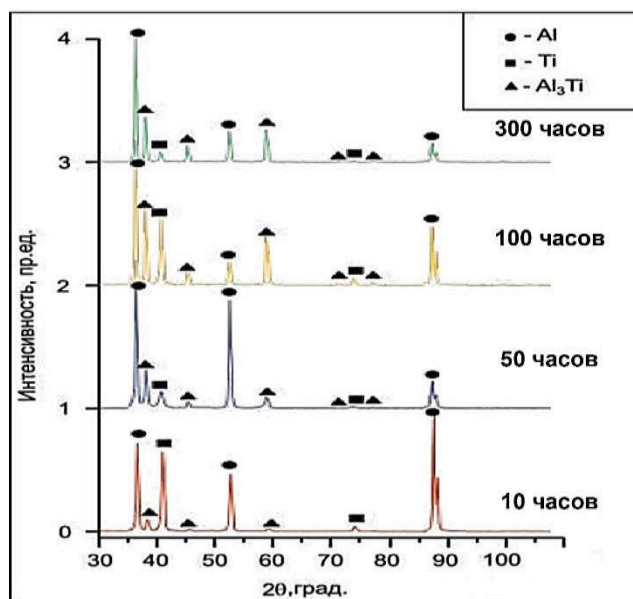


Рис. 4. Фазовый состав композита после отжига при температуре $625 \text{ }^\circ\text{C}$ с различным временем выдержки в печи

Fig. 4. The phase composition of the composite after annealing at a temperature of $625 \text{ }^\circ\text{C}$ with different holding times in the furnace

На рис. 5 представлена микроструктура граничной зоны соединения композиционного гетерогенного материала прошедшего термообработку.

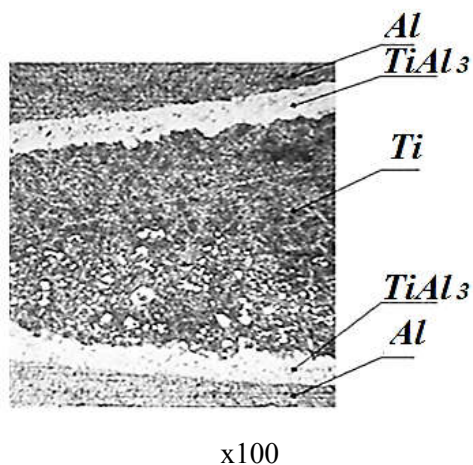


Рис. 5. Микроструктура граничной зоны соединения композиционного гетерогенного броневго материала

Fig. 5. Microstructure of the boundary zone of the composite heterogeneous armor material

Обладая высоким значением твердости, сопоставимой с твердостью закаленной стали интерметаллические $TiAl_3$ слои в составе композиционного гетерогенного материала будут способствовать гашению кинетической энергии баллистического объекта тем самым фрагментируя его на более мелкие осколки, которые в свою очередь будут удерживаться высоковязкими алюминиевыми слоями металлической основы матрицы композита.

Результатами макроскопического анализа структуры материала в месте баллистического воздействия после оценки пулестойкости показано, что наличие перфораций в промежуточных титановых слоях между основными слоями алюминиевой матрицы композита позволило локализовать механизм развития хрупких трещин при баллистическом воздействии на материал, тем самым повысив живучесть самой алюминиевой брони. При взаимодействии с баллистическим объектом в материале образуются хрупкие трещины, которые преимущественно формируются и растут в высокотвердых интерметаллических слоях, расположенных вдоль границы соединения алюминия и титана. Эти трещины

распространяются от точки контакта с баллистическим объектом и, достигнув области перехода от края перфорации к зоне сварки вязкой металлической основы композитной матрицы, останавливаются, что приводит к прекращению их дальнейшего развития. Последний факт обеспечивает условие выхода на максимально возможный уровень прочности соединения, соответствующий прочности металлической основы матрицы композита. Проведенные испытания по оценке прочности показали, что по сравнению с монометаллом матрицы основы композита увеличение прочности композита составило более 20 %.

Таким образом, разрабатываемый композиционный материал представляет собой многослойную композицию (рис. 6), состоящую из нечетного количества слоев.

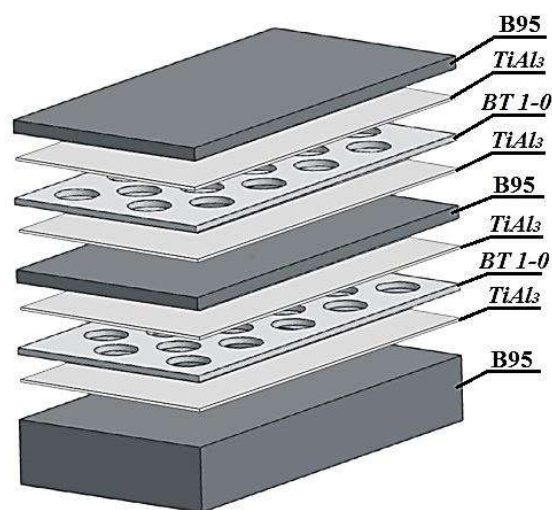


Рис. 6. Внешний вид модели композиционного гетерогенного броневго материала на основе сплавов титана и алюминия

Fig. 6. Appearance of a composite heterogeneous armor material based on titanium and aluminum alloys

Требуемые характеристики материала обеспечиваются особенностью его структуры, представляющей собой чередование в определенной последовательности прочных титановых, высокотвердых интерметаллических и вязких алюминиевых слоев, а также контактом между слоями металлической матрицы композита через перфорации заданной геометрии в армирующих слоях. Упрочнение композицион-

ного материала достигается как за счет наличия в схеме армирования перфораций, обеспечивающих высокопрочное соединение матрицы, так и за счет формирования в его структуре на границах матрицы и перфорированного армирующего элемента интерметаллических высокотвердых слоев регулируемой толщины последующей термической обработкой [4, 5].

С целью оценки броневых характеристик композиционного материала были проведены оценочные испытания на пулестойкость экспериментальных образцов. Испытания проводились в Государственной испытательной станции Российской Федерации по испытаниям ручного огнестрельного оружия и патронов к нему и технических средств защиты (АО «ЦНИИ-ТОЧМАШ», г. Москва).

Для проведения оценочных испытаний экспериментальных образцов композиционного броневых материала на пулестойкость допускается применение как ГОСТ Р 51112-97 так и ГОСТ 34286-2017. Это возможно в связи с тем, что в данных нормативных документах предъявляются одинаковые требования к регламентированным средствам поражения, а так же допускается проведение оценочных испытаний экспериментальных образцов.

При проведении испытаний допускается использование баллистических стволов или огнестрельного оружия, перечисленного в указанных нормативно-технических документах, имеющих аналогичные значения (оружию, перечисленному определяющих параметров – длина ствола, количество, глубина и угол наклона нарезов).

Испытания проводились в нормальных климатических условиях. Испытаниям подвергались экспериментальные образцы композиционных броневых материалов, прошедшие полный цикл термической обработки.

Размеры образцов для испытания на пулестойкость составляли 120×120 мм (рис. 7). Крестами на образцах обозначались места для попадания соответствующих поражающих элементов.

Для оценки пулестойкости по классу защиты Бр3 образцы закреплялись на

стенде неподвижно с углом встречи с пулей 90°. По классу защитной структуры Бр3 обстрел образцов производился с дальности 5±0,1 метров. Для оценки пулестойкости по классу защитной структуры Бр4 обстрел образцов производился с дальности 10±0,1 метров. Замер расстояния осуществлялся дальномером лазерным



Рис. 7. Внешний вид подготовленного для испытания на пулестойкость экспериментального образца композиционного броневых материала
The appearance of an experimental sample of composite armor material prepared for testing for bullet resistance

При обстреле производилось фиксирование скорости полета пули V3, измеренной на расстоянии 3-х метров от дульного среза оружия. Замер скорости пули осуществлялся регистратором скорости полета пули РС-4М.

Обстрел экспериментальных образцов по классу защиты Бр3 производился баллистическим стволом пистолетом Ярыгина (ПЯ), калибром 9 мм. Средствами поражения являлись патроны калибра 9×19 мм, инд. 7Н21 с пулей Пст, п. Г.83-13-539 (тип сердечника - стальной термоупрочненный). Характеристики поражающего элемента – масса 7,0 г; средняя скорость полета пули V3 = 410±10 м/с.

Обстрел экспериментальных образцов по классу защиты Бр4 производился баллистическим стволом автомат АКМ,

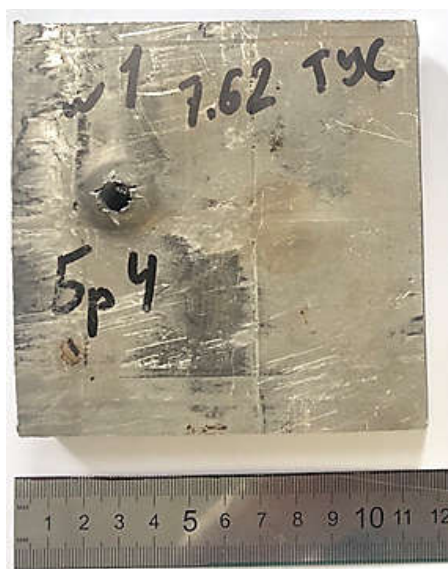
калибром 7,62 мм. Средствами поражения являлись патроны калибра 7,62×39 мм, 57-Н-231, с пулей ПС (тип сердечника - стальной термоупрочненный). Характеристики поражающего элемента – масса 7,9 г; средняя скорость полета пули $V_3 = 720 \pm 15$ м/с.

После каждого выстрела оценивался результат воздействия пули (Пробитие/Непробитие). Образец считают выдержавшим испытания, если отсутствуют сквозное пробитие образца, в том числе при скорости пули выше предельного значения, для данного типа баллистического ствола или огнестрельного оружия; следы пробития экрана-свидетеля вторичными поражающими элементами. Результаты

оценочных испытаний на класс защитной структуры представлены на рисунках 8 и 9.

Результаты оценочных испытаний показали, что при обстреле пятислойных экспериментальных образцов композиционных броневых материалов по классу защитной структуры Бр3 в нормальных климатических условиях, пробития не получены патроном 9×19 мм инд. 7Н21, с пулей Пст. Следовательно, образцы соответствуют классу защитной структуры Бр3.

При оценочных испытаниях пятислойных экспериментальных образцов композиционных броневых материалов по классу защитной структуры Бр4 в нормальных климатических условиях, получены пробития патроном 7,62×39 мм инд. 57-Н-231, с пулей ПС (ТУС).



а)

б)

Рис. 8. Результат оценочных испытаний по классу защиты по пулестойкости Бр3 и Бр4 по ГОСТ 34286-2017 (вид сверху): а – лицевая сторона; б – тыльная сторона

Fig. 8. The result of evaluation tests for the bullet resistance class Br3 and Br4 according to GOST 34286-2017 (top view): a) the front side; b) the back side

Следует отметить, что согласно доступным данным для защиты экипажа бронированных машин от бронебойных пуль калибра 7,62 мм на практике толщина брони составляет порядка 40 мм и обстрел ведется с расстояния 75...150 метров [2]. При оценочных испытаниях, разработанного композиционного броневых материала толщиной 17 мм обстрел калибром 7,62 мм производился с расстояния 10 метров,

то есть практически в упор. Данное обстоятельство свидетельствует о высокой боевой эффективности композиционного материала и предложенного в нем нового способа армирования. Суммарное снижение веса бронированной конструкции при этом составляет порядка от 20 до 25 % при условии сохранения заданного уровня пулестойкости.



Рис. 9. Результат оценочных испытаний по классу защиты по пулестойкости Бр3 и Бр4 по ГОСТ 34286-2017 (вид сбоку)
Fig. 9. The result of evaluation tests for the bullet resistance class Br3 and Br4 according to GOST 34286-2017 (side view)

Заключение

Исследование научно-технической литературы выявило ключевые недостатки традиционных монометаллических алюминиевых броневых материалов, такие как чрезмерная масса и большая толщина, что ухудшает тактико-технические характеристики изделий. Для устранения этих проблем была разработана новая технология армирования композитов с применением сварки взрывом. На её основе создан гетерогенный материал, сочетающий алюминиевые и титановые сплавы. Определены оптимальные параметры ударно-волнового воздействия, обеспечивающие требуемое качество материала. С целью повышения эксплуатационных характеристик предложено формирование в структуре композиционного материала высокотвердых ин-

терметаллических прослоек путём термической обработки. Установлены режимы отжига, позволяющие контролировать их толщину. Изучен фазовый состав интерметаллидов и описан механизм, который препятствует распространению трещин при баллистическом воздействии на материал. Проведённые тесты на пулестойкость подтвердили, что разработанный композит соответствует классу защиты Бр3. Полученные данные свидетельствуют о перспективности предложенной технологии армирования. Это создаёт основу для разработки новых видов броневых материалов, обладающих высокой стойкостью к поражению, конструкционной прочностью и малым весом, что расширяет сферу их применения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Складов В.А., Гребенников С.Ф. Бронетанковая техника: история, конструкция, применение. Москва: Воениздат, 2005. 320 с.
2. Федосеев С.В. Боевые машины пехоты и бронетранспортеры. Москва: Экспринт, 2003. 256 с.
3. Jane's Armour and Artillery. 2020 Edition: Jane's Information Group, 2020. 720 p.
4. Крюков Д.Б. Структурные особенности и технология получения легких броневых композиционных материалов с механизмом локализации хрупких трещин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 103–111.
5. Крюков Д.Б. Перспективные легкие трещиностойкие брони, полученные с применением технологии сварки взрывом. Упрочняющие технологии и покрытия. 2022. Т. 18. № 10 (214). С. 440-443.
6. Крюков Д.Б. Аспекты получения легких броневых композиционных материалов с механизмом локализации хрупких трещин в структуре при баллистическом воздействии. Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии». 2023. № 1 (25). С. 20–28.
7. Патент № 2606134 Российская Федерация, МПК В23К 20/08 (2006.01) В32В 7/04 (2006.01) Способ получения композиционного материала: № 2015134788 : заявл. 18.08.2015 : опубл. 10.01.2017 / Первухин Л.Б., Казанцев С.Н., Крюков Д.Б., Чугунов С.Н., Кривенков А.О., Розен А.Е.; заявитель ФГБОУ ВО "Пензенский государственный университет" – 9 с.
8. Конон Ю.А., Первухин Л.Б., Чудновский А.Д. Сварка взрывом. Москва: Машиностроение, 1987. 216 с.
9. Захаренко И.Д. Сварка металлов взрывом. Минск: Наука и техника, 1990. 205 с.
10. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980, 220 с.

11. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. Учебник для высших учебных заведений. Москва: Машиностроение, 1990. - 528 с.
12. Pervukhin L.B., Kryukov D.B., Krivenkov A.O., and Chugunov S.N. Structural Transformations and Properties of Titanium–Aluminum Composite during Heat Treatment. *Physics of Metals and Metallography*. 2017; Vol. 118, (No.8): 759–763.

13. ГОСТ Р 51112-97. Средства защитные банковские. Требования по пулестойкости и методы испытаний; Введ. 1998-07-01 - Москва: Изд-во стандартов, 1998 – 10 с.
14. ГОСТ 34286-2017. Бронеодежда. Классификация и общие технические требования; Введ. 2019-03-01 - Москва: Изд-во стандартов, 2018 – 8 с.

REFERENCES

1. Sklyarov VA, Grebennikov SF. Armored vehicles: history, design, application. Moscow: Voenizdat, 2005.
2. Fedoseev SV. Infantry fighting vehicles and armored personnel carriers. Moscow: Exprint; 2003.
3. Jane's Armour and Artillery. 2020 Edition: Jane's Information Group; 2020.
4. Kryukov DB. Structural features and technology of light armor composite materials with mechanism of brittle cracks localization. *Metal Working and Material Science*. 2022;24(3):103-111.
5. Kryukov DB. Promising light crack-resistant armor obtained using explosion welding technology. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2022;18(10(214)):440-443.
6. Kryukov DB. Aspects of obtaining light armor composite materials with a mechanism for localizing brittle cracks in the structure under ballistic impact. *Vestnik of Volga State University. Th of Technology. Series "Materials. Constructions. Technologies"*. 2023;1(25):20-28.
7. Pervukhin LB, Kazantsev SN, Kryukov DB, Chugunov SN, Krivenkov AO, Rosen AE RF Patent

- No. 2606134. МПК B23K 20/08 (2006.01) B32B 7/04 (2006.01). Method for obtaining composite material. 2017 Jan 10.
8. Konon YuA, Pervukhin LB, Chudnovsky AD. Explosion welding. Moscow: Mashinostroenie; 1987.
9. Zakharenko ID. Welding of metals by explosion. Minsk: Nauka i Tekhnika; 1990.
10. Deribas AA. Physics of hardening and welding by explosion. Novosibirsk: Nauka; 1980.
11. Lakhtin YuM, Leontyeva VP. Materials science: textbook for higher education institutions. Moscow: Mashinostroenie; 1990.
12. Pervukhin LB, Kryukov DB, Krivenkov AO, Chugunov SN. Structural transformations and properties of titanium–aluminum composite during heat treatment. *Physics of Metals and Metallography*. 2017;118(8):759–763.
13. GOST R 51112-97. Equipment for bank protection. Bullet-proof requirements and test methods. Moscow: Publishing House of Standards; 1998.
14. GOST 34286-2017. Armored clothing. Classification and general specifications. Moscow: Publishing House of Standards; 2018.

Информация об авторах:

Крюков Дмитрий Борисович – кандидат технических наук, доцент, 89033249734, доцент кафедры СЛПиМ Пензенского государственного университета.
Кривенков Алексей Олегович – кандидат технических наук, доцент, 89053652342, доцент кафедры СЛПиМ Пензенского государственного университета.

Kryukov Dmitry Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, 89033249734, Department of Welding, Foundry and Materials Science at Penza State University;
Krivenkov Aleksey Olegovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, 89053652342, Department of Welding, Foundry and Materials Science at Penza State University;

Гуськов Максим Сергеевич – кандидат технических наук, 89603294929, доцент кафедры КиИМ Пензенского государственного университета.
Акимов Антон Алексеевич – бакалавр кафедры СЛПиМ Пензенского государственного университета, тел. 89272874507.

Guskov Maksim Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, 89603294929, Associate Professor of the Department of Control and Testing of Materials at Penza State University;
Akimov Anton Alekseevich - Student of the Department of Welding, Foundry and Materials Science at Penza State University; phone: 89272874507.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 11.04.2025; одобрена после рецензирования 15.05.2025; принята к публикации 26.06.2025. Рецензент – Макаренко К.В., доктор технических наук, профессор Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 11.04.2025; approved after review on 15.05.2025; accepted for publication on 26.06.2025. The reviewer is Makarenko K.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Material Science at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal Transport Engineering.



НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ БАКАЛАВРОВ!

В Брянском государственном техническом университете с 2025 года открывается приём на новое направление подготовки бакалавров
09.03.03 – Прикладная информатика,
профиль «Компьютерное проектирование и дизайн»

Развитие техники и технологий в современном мире предъявляют к промышленным машинам и механизмам не только требования в обеспечении надёжности, долговечности и безопасности, но и требования современного дизайна, эстетичности, удобства пользования и оптимальной конструкции. Современные системы 3D моделирования и виртуализации позволяют на новом уровне переосмыслить промышленный дизайн и создавать инновационную футуристичную продукцию, притягивающую взгляд!

В современной динамично развивающейся России, имеется недостаток в высококвалифицированных специалистах в области компьютерного проектирования и дизайна, которые способны на основе инженерных расчётов разработать инновационный дизайн промышленных объектов с применением самых современных инструментов - промышленных пакетов программ, CAD / CAM / CAE систем, а также 3D прототипирования, систем виртуальной реальности и прикладного программирования.

Объектом профессиональной деятельности выпускника является промышленный дизайн и проектирование технических систем, машин и механизмов с помощью современных IT технологий 3D прототипирования и виртуализации. Областью знаний будущих выпускников является способность выполнять расчёт и проектирование машин и механизмов, применять прикладное программирование для решения технических задач и создавать современный дизайн промышленных объектов с помощью IT технологий.

Будущий выпускник будет востребован конструкторскими организациями, промышленными предприятиями, научно-исследовательскими учреждениями, высшими учебными заведениями в качестве инженера-проектировщика, прикладного программиста или дизайнера технических систем, а материально-техническая база университета и кафедры, квалифицированный преподавательский состав и продуманный учебный план подготовки бакалавра гарантирует получение студентами и глубокими знаниями в области промышленного дизайна, прикладного программирования и проектирования современных промышленных машин, комплексов и оборудования.

Контактная информация

Сайт университета:

www.tu-bryansk.ru

Тел.: 8 (4832) 58-82-64,

Приемная комиссия:

pk@tu-bryansk.ru

8 (4832) 51-03-57

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 669; 621.785.5

doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-46-54

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВАКУУМНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ СТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Светлана Альбертовна Пахомова¹, Марина Алексеевна Гресс^{2✉}

^{1,2} Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

¹ pahomo@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3237-3835>

² dr.mgtu@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5293-3678>

Аннотация

Химико-термическая обработка обеспечивает высокие эксплуатационные свойства и долговечность большинства изделий машиностроения. Показано, что развитие возможности поверхностного упрочнения ответственных деталей может быть связано с применением новых методов их обработки. Разработана модель процесса науглероживания при вакуумной цементации, которая основана на практических результатах. Предложено решение уравнения, определяющего плотность потока углерода в зависимости от технологических факторов насыщения в ацетилене. При разработке расчетного метода учитывали особенность науглероживания низколегированных сталей. Приведены рекомендации по выбору циклической подачи ацетилена.

Циклический режим подачи ацетилена оценивали группой параметров: структурой цикла в виде отношений времени активных τ_a и диффузионных (пассивных) τ_d стадий; суммарным временем активных стадий, суммарным временем диффузионных стадий, их отношением, общим числом циклов n за время насыщения τ . Исследовали две программы: первая предусматривает решение прямой диффузионной задачи, а вторая – обратной диффузионной задачи. Показано, что применение второй программы является предпочтительным.

Ключевые слова: моделирование, диффузия, поток углерода, слой, концентрационные кривые, технологические факторы.

Ссылка для цитирования:

Пахомова С.А. Проектирование технологии вакуумной цементации сталей на основе математического моделирования / С.А. Пахомова, М.А. Гресс // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 7. – С. 46-54. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-46-54.

Original article

Open Access Article

DESIGNING THE TECHNOLOGY OF VACUUM CARBURIZING OF STEELS BASED ON MATHEMATICAL MODELING

Svetlana Albertovna Pakhomova¹, Marina Alekseevna Gress^{2✉}

^{1,2} Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹ pahomo@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3237-3835>

² dr.mgtu@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5293-3678>

Abstract

Chemical and thermal treatment ensures high performance properties and durability of most mechanical engineering products. It is shown that the developing the possibility of surface hardening of critical parts may be associated with the use of new methods of their treatment. A model of vacuum carburizing is developed, which is based on practical results. A solution to the equation determining the carbon flux density depending on the technological saturation factors in acet-

ylene is proposed. When developing the calculation method, the peculiarity of carburization of low-alloy steels was taken into account. Recommendations on the choice of cyclic acetylene supply are given. The cyclic mode of acetylene supply was evaluated by a number of parameters: the cycle structure in the form of time ratios of active τ_a and diffusive (passive) τ_d stages; the total time of active stages, the total time of diffusion stages, their ratio, the total number of n cycles during τ

© Пахомова С. А., Гресс М. А., 2025

saturation. Two programs were studied: the first involves solving a direct diffusion problem, and the second involves solving an inverse diffusion problem. It is shown that the use of the second program is preferable.

Reference for citing:

Pakhomova SA, Gress MA. Designing the technology of vacuum carburizing of steels based on mathematical modeling. *Transport Engineering*. 2025;7:46-54. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-46-54.

Введение

В настоящее время ведущие отечественные предприятия по производству машин и оборудования предпочитают покупать импортные термические устройства, работающие по вакуумной технологии, вместо традиционных газовых методов. Автоматизированные системы, которые используют вакуумную технологию цементации (при низком давлении: 4...15 гПа) или закалки в газовых потоках при высоком давлении, привлекают большое внимание [1–3]. Этот метод упрочнения поверхности деталей машин занял приоритетное положение в зарубежных технологиях [4–6].

Опыт использования вакуумной цементации показал, что технологическая среда из ацетилена, применяемая для науглероживания низколегированных (ГОСТ 1050-2013) сталей является эффективной для ответственных деталей различных отраслей машиностроения и приборостроения.

В работах [10–12] установлено, что при вакуумной цементации ацетилен (C_2H_2) необходимо подавать циклически. Циклическая подача состоит в виде чередования двух стадий: 1) активной, когда в камеру подают ацетилен и 2) пассивной, когда подача отсутствует и процесс осуществляется в вакууме [13]. Особенность ацетилена – способность его молекул адсорбироваться на насыщаемой поверхности и каталитически диссоциировать ($C_2H_2 \rightarrow 2[C] + H_2$). Микроструктура одного и того же участка поверхности образца стали 20ХНМ после разных режимов насыщения показана на рис. 1: слева на каждом фото виден один и тот же отпечаток алмазной пирамиды. Из-за высокой скорости адсорбции и диссоциации уже в начале первой (активной) фазы цикла насыщения на поверхности формируется

Keywords: modeling, diffusion, carbon flux, layer, concentration curves, engineering factors.

непрерывная углеродная пленка, представляющая собой слой сажистого углерода (рис. 1а).

На второй (пассивной) фазе, которая, как было сказано выше, является диффузионной стадией, эта пленка почти полностью растворяется в аустените в зависимости от продолжительности этой фазы (рис. 1б,в). Такую технологию повторяют несколько циклов. При этом углеродный потенциал в газовой среде поддерживают высоким (100 %) и постоянным, что соответствует содержанию углерода в процессе адсорбции.

Управление процессом науглероживания и его контроль в таких условиях путем использования углеродного потенциала насыщающей среды не представляется возможным. Поэтому диффузионный процесс желательно контролировать по технологическим характеристикам. Последние могут меняться в широком диапазоне, а это в свою очередь предполагает большое число вариантов обработки. Таким образом, экспериментальное определение оптимального режима вакуумной цементации значительно усложняется. Возможный выход – разработка расчетного метода, основанного на математическом моделировании предлагаемого технологического процесса. Актуальность такого вопроса побуждала авторов несколько раз обращаться к его решению [14–16]. Однако полученные ранее результаты указывают на необходимость их уточнения и расширения расчетных возможностей.

Основная проблема в разработке расчетного метода заключается в необходимости описания механизма массопереноса углерода из газовой среды в процессе адсорбции и абсорбции. Перечисленные выше процессы определяют уравнение граничного условия, которое является необ-

ходимым фактором для решения диффузионной задачи науглероживания.

Цель данной работы – разработка оптимальной и эффективной расчетной про-

граммы диффузионного насыщения для определения режимов вакуумной цементации низколегированной стали на основе концентрационной кривой углерода.

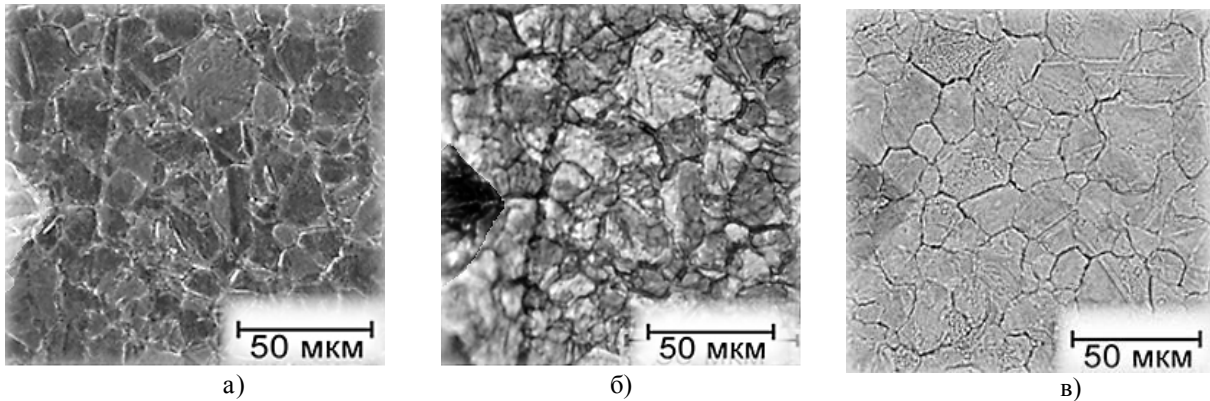


Рис. 1. Микроструктура поверхностного слоя исследуемой стали после трех режимов насыщения в ацетилене: а – активное насыщение $\tau_a = 2$ мин; б – активное насыщение $\tau_a = 2$ мин + пассивная (диффузионная) стадия $\tau_d = 5$ мин; в - активное насыщение $\tau_a = 2$ мин + пассивная стадия $\tau_d = 20$ мин

Fig. 1. Microstructure of the surface layer after three saturation modes in acetylene: a) active saturation $\tau_a = 2$ min; b) active saturation $\tau_a = 2$ min + diffusion stage $\tau_d = 5$ min; c) active saturation $\tau_a = 2$ min + diffusion stage $\tau_d = 20$ min

Материал и методика

В качестве объекта исследования использован промышленный сплав (ГОСТ 103-2006) – низколегированная сталь 20ХНМ. В ранее проведенной работе [10] авторы подробно представили следующие методики: расчет концентрационной кривой углерода; решения кинетического уравнения при известном коэффициенте

диффузии углерода в аустените, а также начальных и граничных условий массопереноса. Математические соотношения, составившие основу расчетного метода, формализовали в программном средстве на языке Object Pascal и в интегрированной среде Delphi. Образцы из исследуемой стали имели следующий химический состав.

Таблица

Химический состав стали по массе, %

Table

Chemical composition of steel by weight, %

C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S
						не более	
0,15...0,2 2	0,6...0,8	0,8...1,2	1,0...1,4	0,4...0,7	0,17...0,3 7	0,035	0,035

Образцы были подвергнуты обычной для зубчатых колес упрочняющей обработке, обеспечивающей высокий предела контактной выносливости и включающей цементацию и термическую обработку. Вакуумная цементация была проведена в печи SECO/WARWICK SA в ацетилене ($t = 940^\circ\text{C}$, $\tau = 5$ ч) по циклическим режимам. При этом режим подачи ацетилена включал две группы циклов. Одна группа цик-

лов обеспечивала активное насыщение углеродом, а другая группа – как активное насыщение углеродом так и диффузионное перераспределение концентрации углерода. Последующая термическая обработка состояла из высокого отпуска ($t = 650^\circ\text{C}$), закалки ($t = 910^\circ\text{C}$), обработки холодом ($t = -70^\circ\text{C}$). Последней операцией был низкий отпуск ($t = 250^\circ\text{C}$, $\tau = 2$ ч). После окончательной термообработки шлифова-

нием удаляли припуск 0,15 мм. В результате, цементовантованный слой обладал следующими параметрами: эффективная толщина 0,9...1,2 мм; концентрация углерода на поверхности 1,2...1,5 %; твердость поверхности HRC 61...63. При этом твердость сердцевины была в диапазоне HRC 35...38.

Исследование микроструктуры образцов проводили на оптическом микроскопе Olympus GX51 (OM). Анализ распре-

Результаты исследований и обсуждение

Концентрации углерода, соответствующие предельной растворимости углерода в аустените и обеспечивающие активность равную единице в интервале температур $t = 880...1040\text{ }^{\circ}\text{C}$, оценивали путем применения программы Thermocalc® 4.0 [14]. Такой анализ вполне допустим при исследовании стали 20ХНМ, насыщаемой углеродом в вакууме, если учитывать ее легированность. Численное решение входящих в расчетную модель уравнений осуществляли на основе применения явной разностной схемы. Устойчивость решения обеспечивали за счет снижения шага разностной схемы по времени и координате.

Цементацию образцов проводили в пределах твердого раствора т.е. до концентрации углерода на поверхности 0,8...0,9 %. При этом стремились не допустить образования карбидной фазы из-за возможного перехода в нее легирующих элементов. Как известно, обеднение матрицы способствует уменьшению прокаливаемости и прочности приповерхностной зоны. Для оптимизации технологического процесса вакуумной цементации в настоящей работе были разработаны две расчетные подпрограммы.

Первая подпрограмма предусматривает решение прямой диффузионной задачи. На основании анализа технологических факторов производится расчет концентрационной кривой углерода. Эта кривая позволяет определить основные параметры диффузионного слоя и сравнивают их с заданными характеристиками. К последним относятся $C_{\text{пов}}$ (концентрации углерода на поверхности) и $h_{\text{эф}}$ (эффективная

толщина углерода в поверхностном слое проводили с использованием спектрального метода на эмиссионном многоканальном спектрометре компании «BAIRD». Результаты были обработаны по ГОСТ 18895-88: путем проведения трех экспериментов с размером области анализа 20 мкм и вычисления их среднего арифметического. Глубина съема при шлифовании равнялась 0,1 мм. Погрешность анализа для углерода не превышала 0,02 %.

толщина слоя с содержанием углерода $C \geq 0,4\text{ \%}$).

По результатам каждого цикла расчета предусмотрена корректировка задаваемых факторов режима, что обеспечивает обратную связь между параметрами диффузионного слоя и факторами технологического процесса. Большое число временных факторов (поверхности $C_{\text{пов}}$ и эффективной толщины слоя $h_{\text{эф}}$ (слой, в котором $C \geq 0,4\text{ \%}$)).

По результатам каждого цикла расчета предусмотрена корректировка задаваемых факторов режима, что обеспечивает обратную связь между параметрами диффузионного слоя и факторами технологического процесса. Большое число временных факторов (τ , τ_a , τ_d , n , $\Sigma\tau_a$, $\Sigma\tau_d$, $\Sigma\tau_a / \Sigma\tau_d$) и широкий диапазон их возможных изменений усложняют поиск нужного решения. Для выполнения расчетных операций разработана блок-схема, представленная на (рис. 2).

Последовательность поиска технологического решения включает:

- расчет коэффициента диффузии для выбранной температуры диффузионного насыщения с учетом термодинамического коэффициента легирования;

- определение общего времени насыщения $\tau = (h / k)^2$ для требуемой эффективной толщины слоя с использованием значения кинетического коэффициента k , который для температур науглероживания 900...940 $^{\circ}\text{C}$ составляет 0,40...0,45;

- выбор значений временных факторов, среди которых определяющее значение имеет $\Sigma\tau_a$; этот фактор дает возможность устанавливать время пассивных ста-

дий $\Sigma\tau_d = \tau - \Sigma\tau_a$ и отношение суммарных времен циклов $\Sigma\tau_a/\Sigma\tau_d$; значимость фактора $\Sigma\tau_a$ состоит в том, что он косвенно определяет количество углерода, которое за время пассивных стадий $\Sigma\tau_d$ будет поглощено

слоем и определит вид концентрационной кривой в соответствии со значениями параметров структуры циклов: τ_a , τ_d , n .

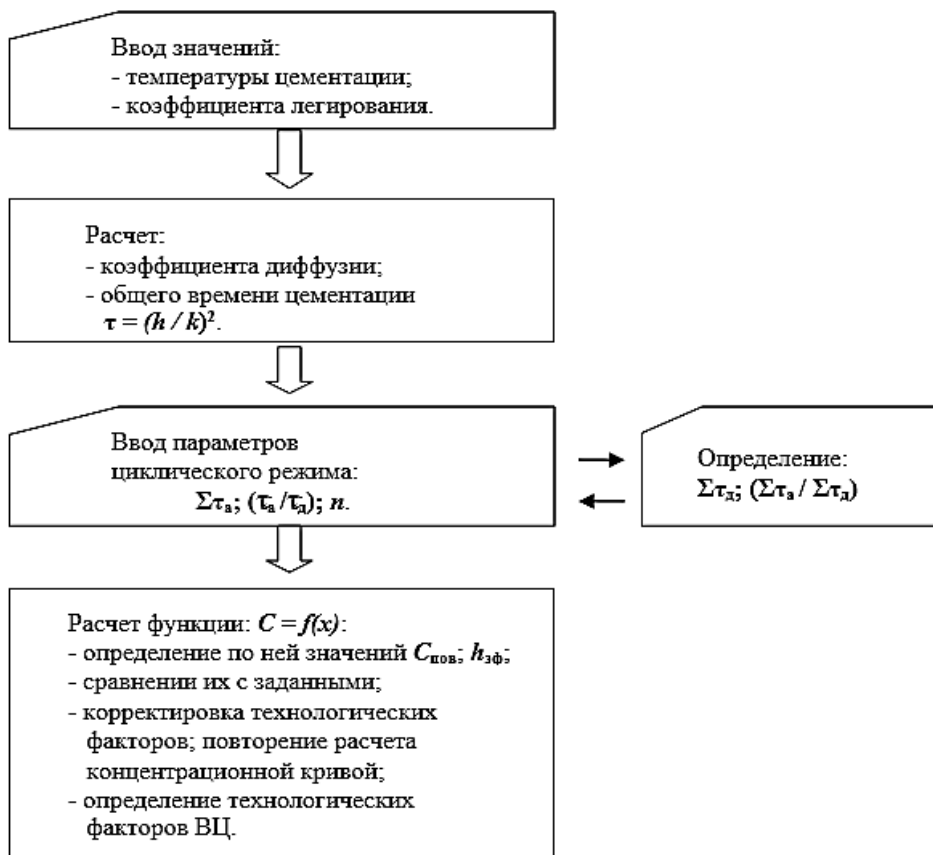


Рис. 2. Блок-схема выполнения расчета концентрационной кривой углерода $C = f(x)$
Fig. 2. Flowchart for calculating the carbon concentration curve $C = f(x)$

В результате расчета определяется режим циклической подачи ацетилена. Проверкой установленного режима служит сравнение рассчитанных концентрационных значений с концентрационными кривыми, построенными по эксперименталь-

ным данным. Например, концентрационные кривые углерода, построенные для циклического режима подачи ацетилена: $5 \cdot (5/10) + 6 \cdot (5/20) + 2 \cdot (5/35)$, имеют следующий вид (рис. 3).



Рис. 3. Концентрационные кривые углерода: 1 – экспериментальная; 2 – расчетная
Fig. 3. Carbon concentration curves: 1 – experimental; 2 – calculated

Анализ приведенных выше результатов показывает, что несоответствие по концентрации углерода между расчетными и экспериментальными данными не превышает 0,10 %. Несоответствие по толщине слоя составляет 0...0,1 мм, что находится в пределах допустимых значений.

К заметному сокращению расчетных операций и повышению эффективности проектирования технологии науглероживания приводит применение второй разработанной подпрограммы.

Вторая подпрограмма предусматривает нахождение оптимальной совокупности технологических факторов на основе решения обратной диффузионной задачи. В этом случае задается концентрационная кривая по совокупности трех точек (рис. 4). Первая из них отвечает концентрации углерода на поверхности; вторая точка - на расстоянии, равном заданной $h_{эф}$; третья точка - на расстоянии, равном 1/3 эффективной толщине слоя. При этом последняя точка оценивает градиент концентрации углерода: $\alpha = (C_{пов} - C_{1/3h_{эф}}) / C_{пов}$.

Решение обратной диффузионной задачи сводится к решению прямой задачи, путем перебора различных вариантов обработки, поиска того режима науглероживания, при котором достигаются допустимые отклонения от заданной концентрационной кривой. Такой поиск осуществляет оптимизационная функция качества, которая оценивает и минимизирует отклонения параметров диффузионного слоя. В качестве примера на рис. 4 показан заданный и рассчитанный концентрационные профили углерода с принятыми в заводской практике допущениями на отклонения: по концентрации углерода $\pm 0,1 \%$; по толщине слоя $\pm 0,1$ мм. Заданное распределение углерода обеспечивает циклическая подача ацетилена по режиму: $(18 (2/6) + 8 (2/20))$, при котором $\tau = 320$ мин, $\Sigma\tau_a = 52$ мин, $\Sigma\tau_a/\Sigma\tau_d \approx 0,2$. Такой режим соответствует следующим показателям, заданным по трем точкам: $C_{пов} = 0,9 \%$; $\alpha = 4,8 \%$; $h_{эф} = 1,0$ мм (кривая 1, см. рис. 4). Расчетная кривая 2 соответствовала следующим показателям: $C_{пов} = 0,89 \%$; $\alpha = 5,6 \%$; $h_{эф} = 1,1$ мм.

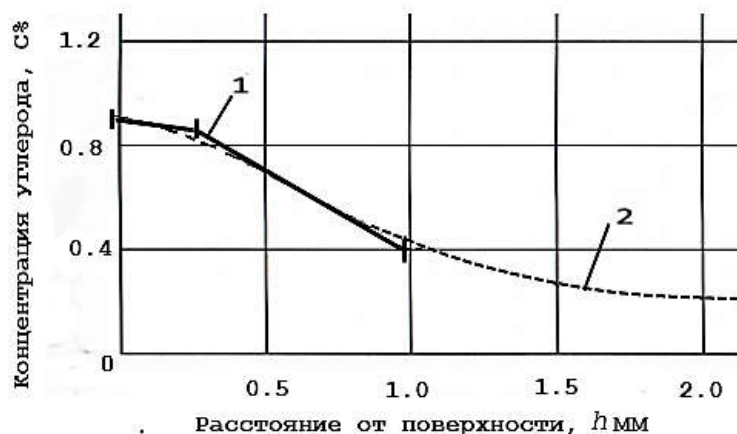


Рис. 4. Концентрационные кривые углерода: 1 - заданная по трем точкам; 2 - расчетная
Fig. 4. Carbon concentration curves: 1 - set at three points; 2 - calculated

Сравнение рис. 3 и 4 показало, что использование второй подпрограммы оказалось более предпочтительным по следующим основаниям:

- значительно сокращается время нахождения нужного режима обработки;
- концентрационный профиль может быть задан с учетом требования

обеспечения необходимого эксплуатационного свойства [17, 18].

Выполненные расчеты и результаты их обобщения дали возможность установить ряд закономерностей, которые целесообразно использовать при вакуумной цементации:

- длительность цементации определяет $h_{эф}$ цементованного слоя;

– характеристики временного режима подачи ацетилена (τ , τ_a , τ_d , n , $\Sigma\tau_a$, $\Sigma\tau_d$, $\Sigma\tau_a/\Sigma\tau_d$) практически не влияют на $h_{эф}$; однако они управляют его насыщенностью;

– основной управляющий параметр режима вакуумной цементации – $\Sigma\tau_a$; увеличение доли $\Sigma\tau_a$ сопровождается ростом концентрации углерода;

– при постоянном значении $\Sigma\tau_a$ комбинация факторов n , τ_a и τ_d оказывает влияние на характер распределения в слое концентрации углерода;

– время активной стадии цикла τ_a должно составлять от 2-х до 5 мин;

– увеличение времени пассивной стадии приводит к снижению концентрации углерода на поверхности, формированию вблизи нее площадки равной концентрации;

– для устранения пересыщения поверхности углеродом целесообразно применять сложные циклы, содержащие 2...3 последних цикла с увеличенной стадией диффузии τ_d ;

– для обеспечения определенных свойств рекомендуется устанавливать отношение $\Sigma\tau_a/\Sigma\tau_d$ соответственно: циклической прочности – 0,1; контактной выносливости – 0,2...0,3; износостойкости – 0,4.

Выводы

1. Разработан расчетный метод проектирования технологических режимов вакуумной цементации низколегированных сталей. Метод включает математическую модель и программное обеспечение, обеспечивающие решение диффузионной задачи с использованием граничного условия 2-го рода, которое оценивает плотность потока углерода, образующегося при диффузионном растворении в стали.

3. Рассмотрено решение прямой и обратной диффузионной задачи. При решении прямой задачи технологические

факторы определяют по результатам анализа концентрационных кривых углерода в цементованном слое; при решении обратной диффузионной задачи параметры технологических факторов определяют в соответствии с заданным распределении концентрации углерода.

3. По результатам выполненных расчетов проведена оценка влияния временных факторов циклической подачи ацетилена на параметры диффузионного слоя. Приведены рекомендации по выбору технологических факторов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wołowicz-Korecka E. Modeling methods for gas quenching, low-pressure carburizing and low-pressure nitriding // *Engineering Structures*. 2018. V. 177. P. 489 - 505. – EDN: FPYNHZ.
2. Болдырев А.П. Влияние фактора износа на характеристики пластинчатых поглощающих аппаратов подвижного состава железных дорог / А. П. Болдырев, А. М. Гуров, П. Д. Жиров [и др.] // *Транспортное машиностроение*. 2024. № 10(34). С. 27-35. DOI 10.30987/2782-5957-2024-10-27-35. – EDN GLNBUK.
3. Pakhomova S. A. Manayev O. I. Effect of Heat Shotblast Treatment Exerted on the Contact Fatigue of Carburised Heat-Resistant Steel C0.12Cr2NiWV // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. Vol. 9, no. 4, pp. 732-735. DOI 10.1134/S2075113318040251. – EDN VBCBAC.
4. Балановский А.Е., Бу В.Г. Насыщение поверхности металла углеродом при плазменной поверхностной обработке // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2017. Т. 13. № 9 (153). С. 403—415. – EDN: ZHBJMP.

5. Reinhold B. Plasma carburizing: exotic with potential. *International Heat Treatment & Surface Engineering*. 2009, vol. 3-4, pp. 136-140. DOI: 10.1179/174951409X12542264514202.
6. Otto F.J., Herring D.H. Vacuum carburizing of aerospace and automotive materials. *Heat Treating Progress*. 2005, vol. 5, no. 1, pp. 33-37.
7. Закономерности массопереноса углерода при цементации в атмосферах низкого давления и граничные условия математической модели/ М.Ю. Семенов, П.Н. Демидов, М.Ю. Рыжова, И.П. Королев // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2016. № 3 (51). С. 102-107. – DOI 10.12737/22048. – EDN WRIVVZ.
8. Моделирование процессов химико-термической обработки на основе интеллектуального анализа данных / С. Н. у. Абсаттаров, Н. К. Турсунов, Э. М. Бахтеев [и др.] // *Universum: технические науки*. 2024. № 9-2(126). С. 5-9. – EDN NNPOTC.
9. Fedorov S., Fedorova L., Zaripov V. [et al.] In-

creasing the wear resistance of the executive surfaces of machine parts concentrated energy flows // *Materials Today: Proceedings: 2019 International Scientific Conference on Materials Science: Composites, Alloys and Materials Chemistry, MS-CAMC, Saint Petersburg. 2020, 30 (3), pp. 388-392. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.382.*

10. Смирнов А.Е. Определение режимов вакуумной цементации на основе расчетного метода / А. Е. Смирнов, Р. С. Фахуртдинов, М. Ю. Рыжова, С. А. Пахомова // *Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 6(162). С. 269-274. – EDN XPNBVR.*
11. Семенов М. Ю., Смирнов А. Е., Рыжова М. Ю. Проблемы моделирования массопереноса углерода из насыщающей атмосферы низкого давления в сталь // *МиТОМ. 2021. № 2(788). С. 39 - 43. – EDN: JUKKHD*
12. Kula P., Pietrasik R., Dybowski K. Vacuum carburizing-process optimization // *Journal of Materials Processing Technology. 2005, vol. 164 – 165, pp. 876-881. – EDN: KLULAR.*
13. Определение углеродного потенциала и коэффициента массопереноса углерода при вакуумной цементации сталей / М. Ю. Семенов, А. Е. Смирнов, Л. П. Фомина, С. Н. У. Абсаттаров // *Металловедение и термическая обработка металлов. 2024. № 1(823). С. 8-13. DOI*

10.30906/mitom.2024.1.8-13. – EDN FTXQTZ.

14. Федин В.М. Обоснование применения новой технологии производства шпинтонов / В. М. Федин, Т. А. Попова, К. А. Чернышев, А. И. Фимкин // *Транспортное машиностроение. 2025. № 1(37). С. 68-78. DOI 10.30987/2782-5957-2025-1-68-78. – EDN LVIOSM.*
15. Комаровский Н.В., Отока А.Г. Особенности проведения испытаний зубчатых колес тяговых передач локомотивов и моторвагонного подвижного состава (обзор) // *Транспортное машиностроение. 2024. №9. С. 27-37. DOI: 10.30987/2782-5957-2024-9-27-37.*
16. Atena H., Schrank F. Neiderdruck-Aufkohlung mit Hochdruck-Gasabsschreckung. *HTM. 2002, vol. 57, no. 4, pp. 247–256. DOI: 10.1515/htm-2002-570407.*
17. Pakhomova S.A., Unchikova M.V., Fakhurtdinov R.S. Gear wheels surface engineering by deformation hardening and carburization. *Materials Science Forum. 2016, 870, pp. 383-391. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.383.*
18. Быков Ю.А., Унчикова М.В., Пахомова С.А., Помельникова А.С., Силаева В.И. Методика выбора материала и технологии термической обработки деталей машиностроения // *Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 8. С. 43-47. – EDN: UCLTCZ.*

REFERENCES

1. Wołowiec-Korecka E. Modeling methods for gas quenching, low-pressure carburizing and low-pressure nitriding. *Engineering Structures. 2018;177:489-505.*
2. Boldyrev AP, Gurov AM, Zhiron PD, Kravtsov SA, Privalov AS. The effect of the wear factor on the characteristics of plate-type shock-absorbing devices of railway rolling stock. *Transport Engineering. 2024;10:27-35. DOI 10.30987/2782-5957-2024-10-27-35.*
3. Pakhomova SA, Manayev OI. Effect of heat shot-blast treatment exerted on the contact fatigue of carburised heat-resistant steel C0.12Cr2NiWV. *Inorganic Materials: Applied Research. 2018;9(4):732-735. DOI 10.1134/S2075113318040251.*
4. Balanovsky AE, Wu VG. Carburization of the metal surface by plasma surface treatment. *Strengthening Technologies and Coatings. 2017;13(9(153)):403-415.*
5. Reinhold B. Plasma carburizing: exotic with potential. *International Heat Treatment and Surface Engineering. 2009;3-4:136-140. DOI: 10.1179/174951409X12542264514202.*
6. Otto FJ, Herring DH. Vacuum carburizing of aerospace and automotive materials. *Heat Treating Progress. 2005;5(1):33-37.*
7. Semenov MYu, Demidov PN, Ryzhova MYu, Korolev IP. Carbon mass transfer regularities at case-hardening in low-pressure atmospheres and boundary conditions of simulator. *Bulletin of Bryansk State Technical University. 2016;3(51):102-*

107. DOI 10.12737/22048.

8. Absattarov SN, Tursunov NK, Bakhteev EM. Modeling thermochemical processes based on data mining. *Universum: Technical Sciences. 2024;9-2(126):5-9.*
9. Fedorov S, Fedorova L, Zaripov V. Increasing the wear resistance of the executive surfaces of machine parts concentrated energy flows. *Proceedings of 2019 International Scientific Conference on Materials Science, 2020: Composites, Alloys and Materials Chemistry; Saint Petersburg: MS-CAMC; 2020;30(3):388-392. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.382.*
10. Smirnov AE, Fakhurtdinov RS, Ryzhova MYu, Pakhomova SA. The definition of conditions of vacuum carburizing on basis of calculation method. *Strengthening Technologies and Coatings. 2018;14(6(162)):269-274.*
11. Semenov M. Yu., Smirnov A. E., Ryzhova M. Yu. Problems of simulation of carbon mass transfer from low-pressure saturating atmosphere into steel. *Metallovedenie I Termicheskaya Obrabotka Metallov. 2021;2(788):39-43.*
12. Kula P, Pietrasik R, Dybowski K. Vacuum carburizing-process optimization. *Journal of Materials Processing Technology. 2005;164–165:876-881.*
13. Semenov MYu, Smirnov AE, Fomina LP, Absattarov SNU. Determination of carbon potential and carbon mass transfer coefficient during vacuum carburization of steels *Metallovedenie I Termicheskaya Obrabotka Metallov. 2024;1(823):8-13. DOI*

- 10.30906/mitom.2024.1.8-13. .
14. Fedin VM, Popova TA, Chernyshev KA, Fimkin AI. Grounds for application of a new technology for tail production. *Transport Engineering*. 2025;1:68-78. DOI 10.30987/2782-5957-2025-1-68-78.
15. Komarovskiy NV, Otoka AG. Features of testing cogged wheels of traction gears of locomotives and multiple rolling stock (review). *Transport Engineering*. 2024;9:27-37. DOI: 10.30987/2782-5957-2024-9-27-37.
16. Atena H, Schrank F. Neiderdruck-Aufkohlung mit Hochdruck-Gasabsschreckung. HTM. 2002;57(4):247–256. DOI: 10.1515/htm-2002-570407.
17. Pakhomova SA, Unchikova MV, Fakhurtdinov RS. Gear wheels surface engineering by deformation hardening and carburization. *Materials Science Forum*. 2016;870:383-391. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.383.
18. Bykov YuA, Unchikova MV, Pakhomova SA, Pomelnikova AS, Silaeva VI. Selection method of material and heat treatment technology for mechanical engineering parts. *Blanking Productions in Mechanical Engineering*. 2015;8:43-47.

Информация об авторах:

Пакхомова Светлана Альбертовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Материаловедение» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, SPIN-cod 7042-6638, Scopus Author ID:7004146473,

Web of Science Researcher ID N-3773-2018, тел. (499) 267-00-71.

Гресс Марина Алексеевна – старший преподаватель кафедры «Материаловедение» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, SPIN-cod 6315-2438, тел. (499) 267-00-71.

Pakhomova Svetlana Albert ovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Material Science Department at Bauman Moscow State Technical University, SPIN-cod 7042-6638, Scopus Author ID:7004146473, Web of Science Researcher ID N-3773-2018; phone +7(499)267-00-71.

Gress Marina Alekseevna – Senior lecturer of Material Science Department at Bauman Moscow State Technical University, SPIN-cod 6315-2438, phone +7(499)267-00-71.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации ии.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 30.04.2025; одобрена после рецензирования 05.06.2025; принята к публикации 26.06.2025. Рецензент – Макаренко К.В., доктор технических наук, профессор Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 30.04.2025; approved after review on 05.06.2025; accepted for publication on 26.06.2025. The reviewer is Makarenko K.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Material Science at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.

Транспортные системы Transport systems

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.4.015:625.03

doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-55-62

ПУТИ СНИЖЕНИЯ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ В КРИВЫХ УЧАСТКАХ ПУТИ

Василий Витальевич Березин^{1✉}, Андрей Владимирович Спиров², Юрий Алектинович Панин³, Тимур Валерьевич Кулув⁴, Тимофей Викторович Ляшенко⁵

^{1,2,3,4,5}Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Коломна, Россия

¹ berezin-vv@vnikti.com

² spirov-av@vnikti.com

³ panin-ua@vnikti.com

⁴ kuluv-tv@vnikti.com

⁵ lyashenko-tv@vnikti.com

Аннотация

Описаны конструктивные решения модернизации экипажа скоростных электропоездов, оказывающих высокий уровень силового воздействия на путь в кривых участках. Решения предусматривают замену кассетных подшипников на роликовые радиальные сферические двухрядные, установку новых букс с поводком на сферическом шарнире, замену штатного сайлентблока на комбинированный с зазорами, обеспечивающего радиальную установку колесных пар в кривых. Представлены результаты моделирования, подтверждающие эффектив-

ность предложенных решений. Установлено, что последний вариант наиболее рационален и может быть реализован в ремонтных депо. Он уменьшает боковые силы в кривых и износ колёс. Для гашения колебаний целесообразно использовать фрикционные гасители, которые в сочетании с гидравлическими демпферами обеспечивают плавность хода даже на высоких скоростях.

Ключевые слова: электропоезд, экипажная часть, буксовые узлы, кузов, моделирование, эффективность.

Ссылка для цитирования:

Березин В.В. Пути снижения силового воздействия скоростных электропоездов в кривых участках пути / В.В. Березин, А.В. Спиров, Ю.А. Панин, Т.В. Кулув, Т.В. Ляшенко // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 7. – С.55-62. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-55-62.

Original article

Open Access Article

WAYS TO REDUCE THE FORCE IMPACT OF HIGH -SPEED ELECTRIC TRAINS IN CURVED SECTIONS OF THE TRACK

Vasily Vitalyevich Berezin^{1✉}, Andrey Vladimirovich Spirov², Yury Alektinovich Panin³, Timur Valeryevich Kuluv⁴, Timofey Viktorovich Lyashenko⁵

^{1,2,3,4,5} Scientific Research and Design Technological Institute of Rolling Stock (JSC "VNIKTI"), Kolomna, Russia

¹ berezin-vv@vnikti.com

² spirov-av@vnikti.com

³ panin-ua@vnikti.com

⁴ kuluv-tv@vnikti.com

⁵ lyashenko-tv@vnikti.com

Abstract

Constructive decisions for upgrading the crew of high-speed electric trains that exert a high level of force on the track in curved sections are described. The decisions provide for the replacement of cassette bearings with radial spherical double-row roller bearings, the installation of new axle boxes with a lock on a spherical hinge, and the replacement of the standard silent block with a combined one with clearances, which ensures the radial installation of wheelsets in curves. The simulation results confirming the effec-

tiveness of the proposed solutions are presented. It is found out that the latter option is the most rational and can be implemented in repair depots. It reduces lateral forces in curves and wheel wear. To dampen vibrations, it is advisable to use friction dampers, which, in combination with hydraulic dampers, ensure smooth running even at high speeds.

Keywords: electric train, underframe, axle boxes, body, modeling, efficiency.

Reference for citing:

Berezin VV, Spirov AV, Panin YuA Kuluv TV, Lyashenko TV. Ways to reduce the force impact of high-speed electric trains in curved sections of the track. *Transport Engineering*. 2025;7:55-62. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-55-62.

Скоростные электропоезда «Ласточка», «Иволга», «АЭРО», которые эксплуатируются на железных дорогах России,

имеют близкие по конструкции двухосные тележки (рис. 1).

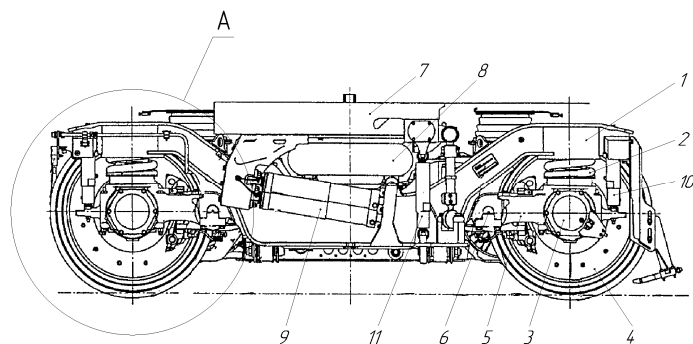


Рис. 1. Тележка электропоезда ЭС1 («Ласточка»): 1 – рама тележки; 2 – пружина буксовой ступени рессорного подвешивания; 3 – букса; 4 – колесная пара; 5 – поводок; 6 – сайлентблок; 7 – кузов; 8 – пневмобаллон; 9 – гаситель колебаний виляния тележки; 10 – гаситель колебаний буксовой ступени; 11 – гаситель колебаний центральной ступени рессорного подвешивания

Fig. 1. Trolley of the ES1 electric train ("Swallow"): 1 – trolley frame; 2 – spring of the axle box stage of spring suspension; 3 – axle box; 4 – wheelset; 5 – leash; 6 – silent block; 7 – body; 8 – pneumatic cylinder; 9 – dampener of vibrations of wagging of the trolley; 10 – vibration dampener of the axle box stage; 11 – vibration dampener of the central stage of the spring suspension

Проведенные АО «ВНИИЖТ» испытания данного подвижного состава (далее ПС) показали высокий уровень силового воздействия на путь в кривых участках пути. Так, боковые силы на путь в кривой радиусом 350 м на полигоне Белореченская – Майкоп достигали 100 кН [1]. Указанное явление способствует повышенному износу гребней колес, что и подтверждается их эксплуатацией, особенно на перегонах с большим количеством кривых малого радиуса. Проведенный анализ и моделирование показали, что причиной является высокая жесткость поперечной связи колесных пар с рамой тележки (более 20 кН/мм, которую при одноповодко-

вых буксах с кассетными подшипниками создают поперечная жесткость пружин буксовой ступени и аксиальная жесткость резинометаллических сайлентблоков) [2, 3].

Для устранения этого недостатка предлагалось два варианта модернизации буксового узла, обеспечивающие снижение поперечной жесткости связи колесных пар с рамой тележки:

- установка вместо кассетных подшипников роликовых радиальных сферических двухрядных (рис. 2а);

- изготовление новых корпусов букс, в которых предусмотрен кронштейн для крепления нового поводка со сферическим

шарниром. При этом другой конец поводка соединяется с рамой тележки серийным (штатным) резинометаллическим шарниром (рис. 2б).

С такими конструктивными изменениями буксового соединения снижается поперечная жесткость связи (перемещений

Х – см. рис. 2) колесной пары с рамой тележки с 20,0 кН/мм до 5,0–8,5 кН/мм. А боковая сила в кривой радиусом 300 м, как показало моделирование, может снизиться с 10 тс до 6,7 тс, показатель износа (фактор износа) гребней колес и рельсов – в 1,4...1,6 раз [3].

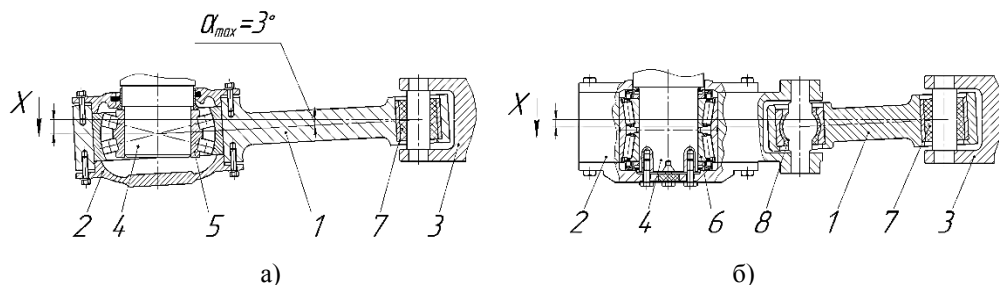


Рис. 2. Варианты модернизации буксового узла тележки: 1 – поводок; 2 – букса; 3 – рама тележки;

4 – ось колесной пары; 5 – сферический подшипник; 6 – кассетный подшипник;

7 – штатный резинометаллический шарнир; 8 – сферический резинометаллический шарнир (сайлентблок)

Fig. 2. Options for upgrading the axle box of the trolley: 1 – leash; 2 – axle box; 3 – trolley frame; 4 – wheelset axle; 5 – spherical bearing; 6 – cassette bearing; 7 – standard rubber-metal hinge; 8 – spherical rubber-metal hinge (silent block)

Представленные выше варианты требуют все же существенного изменения буксового узла и материальных затрат. Вследствие этого, опираясь на опыт ранее проведенных исследований и испытаний, АО «ВНИКТИ» еще один конструктивный вариант модернизации буксового узла для «Ласточки». В этом варианте серийный

(штатный) сайлентблок в соединении поводка с рамой тележки заменяется на комбинированный, состоящий из наружной и внутренней втулок, между которыми закреплена резиновая вставка (рис. 3). Между наружной и внутренней втулками предусмотрены зазоры Δ .

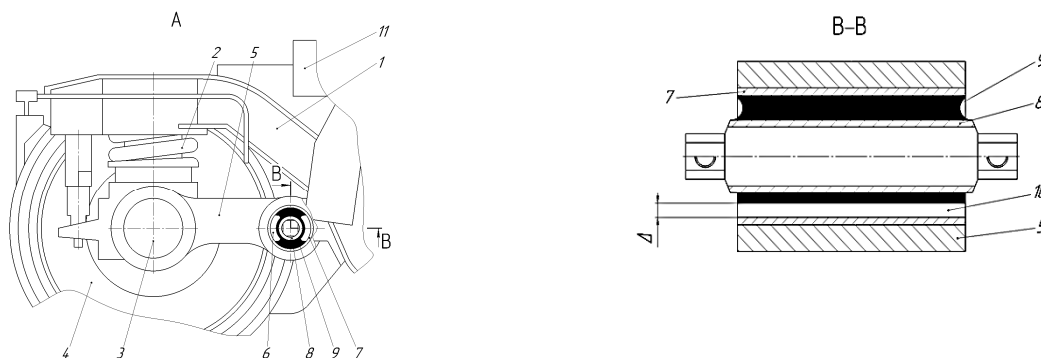


Рис. 3. Вариант модернизации тележки «Ласточки»: 1 – рама тележки; 2 – пружина буксовой ступени рессорного подвешивания; 3 – букса; 4 – колесная пара; 5 – поводок; 6 – комбинированный сайлентблок;

7 – наружная втулка; 8 – внутренняя втулка; 9 – упругий элемент (резина); 10 – зазор Δ ; 11 – кузов

Fig. 3. Upgrade option for the Swallow trolley: 1 – trolley frame; 2 – spring of the axle box stage of spring suspension; 3 – axle box; 4 – wheelset; 5 – leash; 6 – combined silent block; 7 – outer sleeve; 8 – inner sleeve; 9 – elastic element (rubber); 10 – gap Δ ; 11 – body

Как показали расчеты, такая конструкция сайлентблока снижает аксиальную жесткость на 25...35 % в сравнении с цельным цилиндрическим изделием, а радиальная продольная жесткость вдоль оси

тележки в пределах зазора Δ может составить в зависимости от марки резины, толщины и ее длины от 1,5 кН/мм до 6,0...7,0 кН/мм. Подвижность букс в продольном отношении относительно рамы тележки направлении

обеспечит установку колесных пар в кривых близкой к радиальной (далее РУКП).

Исследование динамики экипажа типа «Ласточка» с указанной модернизацией тележек механизмом РУКП осуществлялось программой комплекса «Универсальный механизм» (УМ).

Из ранее проведенных многочисленных исследований и испытаний [4] было установлено, что из-за обеспечения возможности угловых перемещений колесным парам (т.е. их поворота) относительно рамы тележки в кривых участках пути, на прямых участках у них возникают повышенные виляния, провоцирующие колебания виляния кузова. Для гашения этих колебаний нами были, с разной степенью эффективности, исследованы следующие варианты установки гасителей колебаний:

- горизонтальные (продольные) гидродемпферы между буксой и рамой тележки;

- горизонтальные (продольные) гидродемпферы, установленные между синхронизаторами букс и рамой тележки (по аналогии тележек тепловоза 2ТЭ25А «Витязь»);

- горизонтальные гидравлические или фрикционные демпферы отбоя кузова относительно рамы тележки.

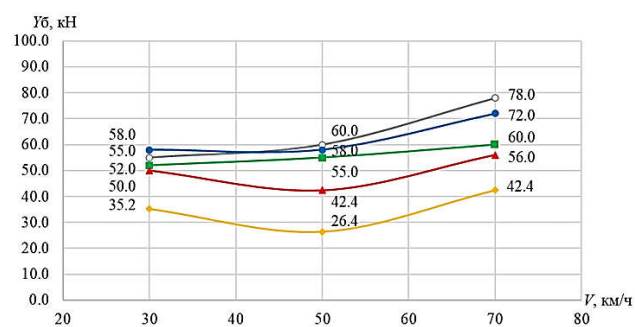


Рис. 4. Значения боковых сил (Y_b) модели экипажа: —○— штатное исполнение;

с элементами экипажа с РУКП и жесткостью продольной связи буксы с рамой тележки $J_{\text{прод}}$:

—●— $J_{\text{прод}} = 6,0 \text{ кН/мм}$, —■— $J_{\text{прод}} = 4,0 \text{ кН/мм}$,
—▲— $J_{\text{прод}} = 2,0 \text{ кН/мм}$, —◆— $J_{\text{прод}} = 1,5 \text{ кН/мм}$

Fig. 4. Values of lateral forces (Y_b) of the crew model:

—○— standard design; with crew elements with radial wheelset and rigidity of the longitudinal coupling of the axle box with the trolley frame S_{long} :

—●— $S_{\text{long}} = 6,0 \text{ кН/мм}$ —■— $S_{\text{long}} = 4,0 \text{ кН/мм}$
—▲— $S_{\text{long}} = 2,0 \text{ кН/мм}$ —◆— $S_{\text{long}} = 1 \text{ кН/мм}$

Эффективность РУКП зависит от жесткости продольной связи букс с рамой тележки [5].

Вследствие изложенного, параметры, которые изменялись при моделировании движения «Ласточки» по прямым и кривым участкам пути, позволили сделать выбор рациональной жесткости продольной связи букс с рамой тележки и эффективной конструкции гасителя и его параметров для демпфирования колебаний виляния.

Расчеты показали эффективность предложенного конструктивного решения по снижению силового воздействия на путь в кривых. Оптимальная величина зазора Δ , обеспечивающая РУКП, безопасные кинематические перемещения в муфтах тягового привода и клещевых механизмах тормозов, а также долговечность работы резиновых элементов комбинированных сайлентблоков, должна быть в пределах 3...3,5 мм. При этом в кривой радиусом 300 м боковая сила, достигавшая 78 кН при штатном исполнении экипажа на скорости 70 км/ч, снижалась по мере уменьшения продольной жесткости связи поводков букс с рамой $J_{\text{прод}}$ с 6,0 кН/мм до 1,5 кН/мм (рис. 4), соответственно, на 5...7 %.

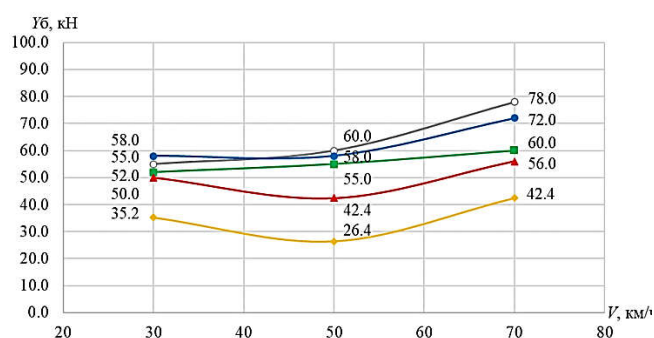


Рис. 5. Значения фактора износа (T_{gamma}) модели экипажа: —○— штатное исполнение;

с элементами экипажа с РУКП и жесткостью продольной связи буксы с рамой тележки $J_{\text{прод}}$:

—●— $J_{\text{прод}} = 6,0 \text{ кН/мм}$, —■— $J_{\text{прод}} = 4,0 \text{ кН/мм}$,
—▲— $J_{\text{прод}} = 2,0 \text{ кН/мм}$, —◆— $J_{\text{прод}} = 1,5 \text{ кН/мм}$

Fig. 5. Values of the crew model wear factor (T_{gamma}):

—○— standard design; with crew elements with radial wheelset and rigidity of the longitudinal coupling of the axle box with the trolley frame S_{long} :

—●— $S_{\text{long}} = 6,0 \text{ кН/мм}$, —■— $S_{\text{long}} = 4,0 \text{ кН/мм}$,
—▲— $S_{\text{long}} = 2,0 \text{ кН/мм}$, —◆— $S_{\text{long}} = 1 \text{ кН/мм}$

Результаты расчета износа гребней колес вследствие уменьшения боковых сил представлены на рис. 5. Высокую эффективность следует ожидать при $J_{\text{прод}}$ в диапазоне 1,5...2,0 кН/мм.

Уменьшение жесткости поперечной связи колесных пар с рамой тележки и обеспечение возможности угловых перемещений (виляния) колесных пар относительно рамы тележки повысило, как указывалось выше, уровень горизонтальных (поперечных) ускорений кузова (ГУ) (рис. 6) и плавности хода (W_r) модели в прямых участках пути.

Исследования по снижению амплитуд горизонтальных колебаний установкой

гасителей колебаний по указанным выше вариантам а) и б) показали малую эффективность. Кроме того, их размещение на раме тележки потребует существенного изменения ее конструкции.

Повышение демпфирующей способности штатных гидrogасителей поперечных колебаний (закрепленных одним концом на поперечной балке, другим – к шкворню кузова) даже в два раза незначительно снизило уровень горизонтальных колебаний кузова ГУ и плавности хода W_r : уже при скорости 100 км/ч ГУ превысили норматив 0,12·g (рис. 6 «два гидrogасителя»), а W_r – при 90 км/ч норматив в 3,25.

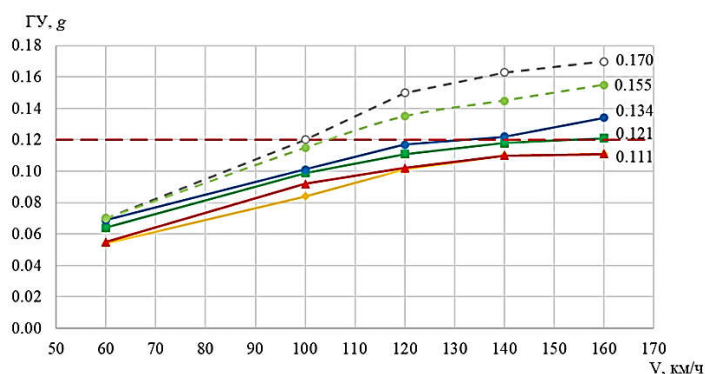
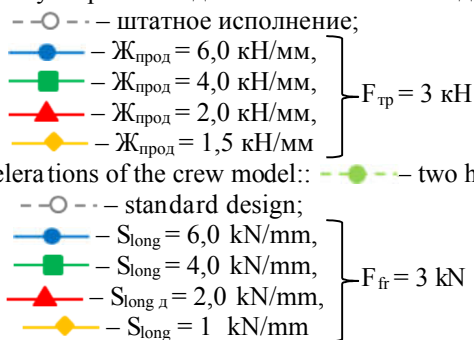


Рис. 6. Значения горизонтальных ускорений модели экипажа: —●— два гидrogасителя,



Как показали ранее приведенные исследования [4], гидравлические гасители колебаний в начале развития малых амплитуд колебаний отбоя кузова не обеспечивают необходимую силу для гашения колебаний. Поэтому после развития резонанса эти гасители уже не в состоянии погасить амплитуды колебаний до приемлемого уровня. Лучшим вариантом в этом случае может быть установка фрикционных гасителей, поскольку сила трения на штоке гасителя не зависит от скорости его перемещения, он начинает эффективно работать при любых амплитудах и скоростях

перемещения штока. С увеличением энергии колебаний при повышении скорости движения совместная работа фрикционного и гидравлического гасителей обеспечивает сохранение хорошей плавности хода в горизонтальном направлении. Ориентировочно компактную конструкцию и схему установки такого фрикционного гасителя колебаний можно выполнить в соответствии с рис. 7, по аналогии с гасителями горизонтальных поперечных колебаний, установленными на тепловозах 2ТЭ121[5] и 2ТЭ116 №1369 с РУКП [6].

Моделированием установлено, что оптимальное значение силы трения ($F_{тр}$) на штоке фрикционного гасителя, установленного параллельно гидравлическому га-

сителю, должно быть около 3 кН (рис. 8–10). В этом случае даже при скорости движения 160 км/ч ГУ были ниже норматива $0,12 \cdot g$, а плавности хода – 3,25.

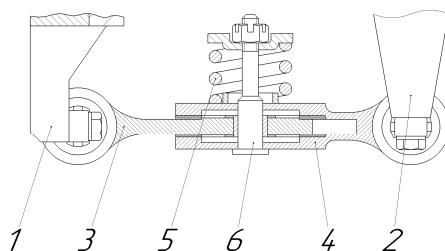


Рис. 7. Фрикционный гаситель колебаний: 1 – кронштейн на шкворне кузова; 2 – кронштейн на поперечной балке рамы тележки; 3 – шток фрикционного гасителя колебаний; 4 – пластины; 5 – нажимная пружина; 6 – направляющая
Fig. 7. Friction vibration dampener: 1 – bracket on the body bolt; 2 – bracket on the crossbeam of the trolley frame; 3 – rod of the friction vibration dampener; 4 – plates; 5 – pressure spring; 6 – guide rail

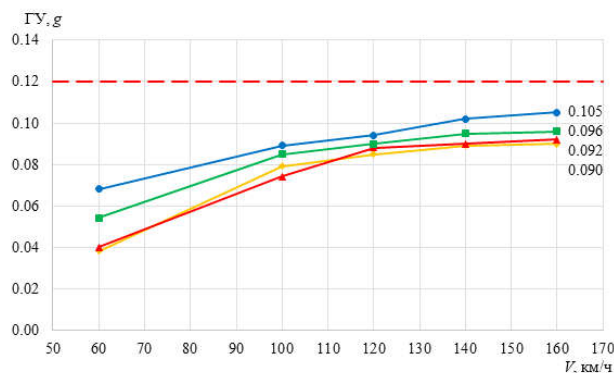


Рис. 8. Значения горизонтальных ускорений модели экипажа:

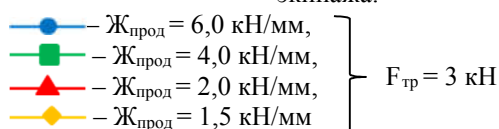
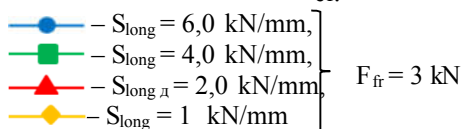


Fig. 8. Values of horizontal accelerations of the crew model:



Выводы

Предложенный авторами вариант модернизации экипажа электроподвижного состава, обращающегося преимущественно в регионах с большим количеством кривых участков пути, позволит существенно снизить износ гребней колес и рельсов. Эффективность использования в экипаже радиальной установки колесных

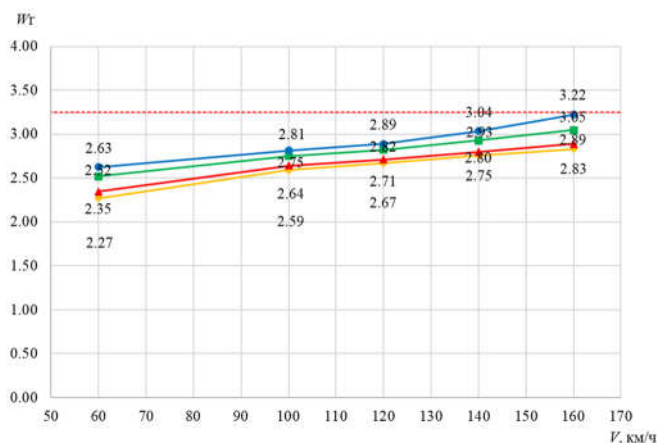


Рис. 9. Значения показателя плавности хода в горизонтальной плоскости (Wg) модели экипажа:

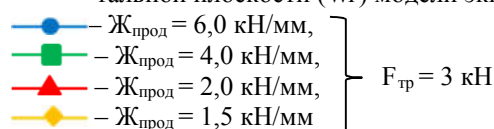
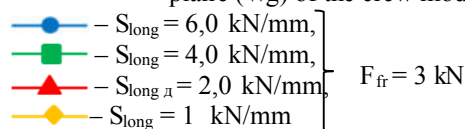


Fig. 9. Values of the smoothness index in the horizontal plane (Wg) of the crew model:



пар подтверждается эксплуатацией подвижного состава не только у нас в стране, но и за рубежом.

Важным преимуществом указанной модернизации является ее невысокая стоимость и возможность проведения в ремонтных депо.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Экспериментальная оценка взаимодействия экипажа и пути при скоростном и высокоскоростном движении / А. М. Бржезовский, Д. Н. Аршинцев, О. Г. Бржезовская [и др.] ; под редакцией канд. техн. наук А. М. Бржезовского. М.: РАС, 2019. 148 с. – ISBN 978-5-6040530-8-9.
2. Коссов, В.С. К вопросу выбора рациональных характеристик связей в горизонтальной плоскости экипажа скоростного моторвагонного подвижного состава для эксплуатации на полигонах с большим количеством кривых малого радиуса / В. С. Коссов, В. В. Березин, И. Е. Ильин, А. С. Пономарев // Техника железных дорог. 2024. № 1. С. 56-62.
3. Коссов, В.С. Определение рациональных характеристик упруго-диссипативных связей в

горизонтальной плоскости железнодорожных экипажей для эксплуатации на различных полигонах и диапазонах скоростей движения / В.С. Коссов, В.В. Березин, М.А. Гаврюшин, Т.В. Кулув // Транспортное машиностроение. 2024. № 12. С. 37-49.

4. Березин, В. В. Проблемы извилистого движения локомотивов / В. В. Березин, М. А. Гаврюшин, Т. В. Кулув // Вестник ВНИКТИ. 2018. № 101. С. 100-107.
5. Тепловозы СССР. Отраслевой каталог 18-5-88. М.: ЦНИИТЯЖМАШ, 1988. 167 с.
6. Березин, В. В. Комплексные испытания тепловоза 2ТЭ116 с радиальной установкой колесных пар / В. В. Березин, В. Г. Гусаков, Л. К. Добрынин, А. И. Кокорев [и др.] // Труды ВНИТИ. 1997. Вып. 76. С. 60-70.

REFERENCES

1. Brzhezovsky AM, Arshintsev DN, Brzhezovskaya OG. Experimental assessment of the interaction of the carriage and the track in high-speed traffic. Moscow: RAS; 2019.
2. Kossov VS, Berezin VV, Ilyin IE, Ponomarev AS. On the issue of choosing rational characteristics of the horizontal plane links of the high-speed multiple unit rolling stock undercarriage for operation on the landfills with a large number of sharp curves. Railway Equipment Journ. 2024;1:56-62.
3. Kossov VS, Berezin VV, Gavryushin MA, Kuluv TV. Determination of rational characteristics of elastic-dissipative connections in the horizontal

plane of railway carriages for use in various grounds and speed ranges. Transport Engineering. 2024;12:37-49.

4. Berezin VV, Gavryushin MA, Kuluv TV. Problems of nosing motion of locomotives. Vestnik VNIKTI. 2018;101:100-107.
5. Diesel locomotives of the USSR. Industry catalog 18-5-88. Moscow: TSNIITYAZHMASH; 1988.
6. Berezin VV, Gusakov VG, Dobrynin LK, Kokorev AI. Complex tests of 2TE116 diesel locomotive with radial wheelset. Trudi VNITI. 1997;76:60-70.

Информация об авторах:

Березин Василий Витальевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), тел. +7 (4966) 18-82-48, доб. 11-17.

Спилов Андрей Владимирович – заведующий отделением, Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), тел. +7(496)618-05-99, доб. 11-63.

Панин Юрий Алектинович – кандидат технических наук, заведующий отделом, Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-

торско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), тел. +7 (4966) 18-82-48, доб. 11-80.

Кулув Тимур Валерьевич – инженер 1 категории, Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), тел. +7 (4966) 18-82-48, доб. 12-01.

Ляшенко Тимофей Викторович – инженер 2 категории, Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), тел. +7 (4966) 18-82-48, доб. 12-01.

Berezin Vasily Vitalyevich – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Scientific Research and Design and Technological Institute of Rolling Stock (JSC "VNIKTI"), phone: +7 (4966) 18-82-48, ext. 11-17.

Spirov Andrey Vladimirovich – Head of the Department, Scientific Research and Design and Tech-

nological Institute of Rolling Stock (JSC "VNIKTI"), phone: +7(496)618-05-99, ext. 11-63.

Panin Yury Alektinovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department, Scientific Research and Design and Technological Institute of Rolling Stock (JSC "VNIKTI"), phone: +7 (4966) 18-82-48, ext. 11-80.

Kuluv Timur Valeryevich – Engineer of the 1st category, Scientific Research and Design and Technological Institute of Rolling Stock (JSC "VNIKTI"), phone: +7 (4966) 18-82-48, ext. 12-01.

Lyashenko Timofey Viktorovich – Engineer of the 2nd category, Scientific Research and Design and Technological Institute of Rolling Stock (JSC "VNIKTI"), phone: +7 (4966) 18-82-48, ext. 12-01.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 07.04.2025; одобрена после рецензирования 30.05.2025; принята к публикации 26.06.2025. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 07.04.2025; approved after review on 30.05.2025; accepted for publication on 26.06.2025. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal Transport Engineering.



НОВАЯ СПЕЦИАЛЬНОСТЬ!

***В Брянском государственном техническом университете в 2025 году открыт приём
на новую специальность***

***23.05.03 – Подвижной состав железных дорог,
специализация «Технология производства и ремонта подвижного состава»***

Подготовка предусматривает освоения фундаментальных основ конструкции, технического обслуживания и ремонта подвижного состава железных дорог с применением предиктивной аналитики, систем искусственного интеллекта и работы с большими объемами данных. Обучение организовано в интересах крупнейших предприятий в области обслуживания и ремонта подвижного состава таких, как ООО «Локотех», ОАО «РЖД», ООО «Новая вагоно-ремонтная компания» и другие.

Начиная со второго курса обучения студентам предоставляется возможность оплачиваемой стажировки на структурных подразделениях компаний с целью приобретения практических навыков необходимых для освоения профессий технолога и инженера. В рамках освоения программы значительное внимание уделяется современным методам прогнозирования технического состояния подвижного состава, системам массового обслуживания и ремонта сложных технических систем, прогнозирования фактического состояния ответственных узлов подвижного состава и оценке рисков возникновения аварийных ситуаций.

Приобретенные по программе специалитета компетенции позволяют обучающимся стать высококвалифицированными специалистами, которые смогут применить полученные знания и навыки на практике, участвуя в реализации стратегических проектов по развитию железнодорожной инфраструктуры страны.

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.065

doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-63-71

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ПОДХОД К УВЕЛИЧЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ СЛИВНЫХ ПРИБОРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЦИСТЕРН ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ НЕФТЕПРОДУКТОВ И СНИЖЕНИЮ РИСКОВ ИХ НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫХ РАЗЛИВОВ В ПУТИ СЛЕДОВАНИЯ

Олег Сергеевич Кузьмин¹, Андрей Николаевич Луценко², Елена Сергеевна Куликова^{3✉}, Елена Альбертовна Антонычева⁴

^{1,2,4}Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС)

³Тихоокеанский государственный университет (ТОГУ)

¹readheadunit@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-5301-9231>

²andyhab@mail.ru

³kulikovaes@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2125-8177>

⁴antonycheva64@mail.ru

Аннотация

Перевозка нефтепродуктов железнодорожным видом транспорта тесно сопряжена с постоянным присутствием рисков нанесения ущерба окружающей среде, которое зачастую выражено в несанкционированных разливах перевозимых грузов в результате тяжелых аварий, либо капельных течей, преимущественно происходящих в сливных приборах железнодорожных цистерн. В этой связи, вопрос снижения рисков возникновения таких случаев является особо значимым как в вопросе защиты окружающей среды от загрязняющего воздействия в результате реализации перевозочного процесса, так и в вопросе потерь ценного энергетического сырья.

Цель исследования – определить причины и механизмы, снижающие эксплуатационную надежность сливных узлов железнодорожных цистерн и разработать технические решения по их увеличению.

Актуальность работы обеспечена продолжающейся тенденцией к несанкционированным разливам нефтепродуктов, происходящих в пути их следования. Научная новизна заключается в применении инновационного подхода к модернизации конструктивных элементов подвижного состава, перевозящего нефтепродукты, в сторону обеспечения сохранности груза и защиты окружающей среды. Практическая значимость работы заключается в решении актуальных проблем неисправностей сливных систем железнодорожных цистерн за счет предложений по использованию инновационных решений, адаптированных из опыта сооружения и эксплуатации технологических трубопроводов для нефти, газа и продуктов их переработки.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, нефтепродукты, цистерна, разлив, транспортные системы, окружающая среда, устройства, тапонирование.

Ссылка для цитирования:

Кузьмин О.С. Альтернативный подход к увеличению надежности сливных приборов железнодорожных цистерн для перевозки нефтепродуктов и снижению рисков их несанкционированных разливов в пути следования // О.С. Кузьмин, А.Н. Луценко, Е.С. Куликова, Е.А. Антонычева // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 7. – С. 63-71. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-63-71.

Original article

Open Access Article

AN ALTERNATIVE APPROACH TO INCREASE THE RELIABILITY OF RAILWAY TANK DRAIN DEVICES FOR TRANSPORTATION OF PETROLEUM PRODUCTS AND TO REDUCE RISKS OF THEIR UNAUTHORIZED SPILLS EN ROUTE

Oleg Sergeevich Kuzmin¹, Andrey Nikolaevich Lutsenko², Elena Sergeevna Kulikova^{3✉}, Elena Albert ovna Antonycheva⁴

© Кузьмин О. С., Луценко А. Н., Куликова Е. С., Антонычева Е. А., 2025

^{1,2,4} Far Eastern State Transport University (FESTU)

³ Pacific National University (TOGU)

¹ readheadunit@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-5301-9231>

² andyhab@mail.ru

³ kulikovaes@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2125-8177>

⁴ antonycheva64@mail.ru

Abstract

Transportation of petroleum products by rail is closely associated with the constant presence of risks of environmental damage, which is often connected with unauthorized spills of transported goods as a result of severe accidents or drip leaks, mainly occurring in the drains of railway tanks. In this regard, the problem of reducing the risks of such cases is particularly important both for protecting the environment from polluting effects as a result of the transportation process, and regarding losses of valuable energy raw materials. The study objective is to find out the causes and mechanisms that reduce the operational reliability of drain units of railway tanks and to develop technical solutions to increase them.

The relevance of the work is ensured by the continuing trend towards unauthorized spills of petro-

leum products occurring along their route. The scientific novelty is in the application of an innovative approach to the modernization of structural elements of rolling stock transporting petroleum products, in the direction of cargo safety and environmental protection. The practical significance of the paper is in solving urgent problems of malfunctions of railway tank drain devices by proposing the use of innovative solutions adapted from the experience of the construction and operation of technological pipelines for oil, gas and their refinery products.

Keywords: railway transport, petroleum products, tank, spill, transport systems, environment, devices, plugging.

Reference for citing:

Kuzmin OS, Lutsenko AN, Kulikova ES, Antonicheva EA. An alternative approach to increase the reliability of railway tank drain devices for transportation of petroleum products and to reduce the risks of their unauthorized spills en route. *Transport Engineering*. 2025;7:63-71. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-63-71.

Введение

Перевозка нефтепродуктов железнодорожным видом транспорта отмечается одной из наиболее экологически опасных на всех этапах ее реализации [1, 2]. Это прежде всего выражено в несанкционированных разливах продуктов нефтепереработки. Наиболее упоминаемым источником загрязнения являются разливы, происходящие на этапе следования опасного груза [3–5].

Основными причинами таких разливов, выделяются механические повреждения цистерн железнодорожных цистерн в результате их схода с рельс с последующим опрокидыванием [6].

Распространёнными причинами таких аварийных ситуаций являются ошибки лиц, ответственных за перевозки либо обеспечение надлежащего технического состояния парка железнодорожных цистерн, а также состояние железнодорожного пути [7]. При этом наибольшая доля таких инцидентов при перевозке нефтепродуктов особенно велика на Дальневосточной железной дороге [8].

Согласно [9] за период с января 2020 по апрель 2024 г. по направлению Хабаровск – Комсомольск-на-амуре ДВЖД зарегистрировано 49 инцидентов, связанных с утечкой нефтепродуктов из железнодорожных цистерн. Не стоит упускать из внимания и возникновение таких аварий в результате совершения террористической деятельности, а также различного рода диверсий, что особенно актуально в современных реалиях [9].

Однако вышеперечисленные причины скорее относятся к крайним проявлениям аварий, нежели рядовыми штатными ситуациями.

Вместе с тем в ходе реализации этапа следования груза необходимо отметить несанкционированные выходы нефтепродуктов в результате капельных течей, возникающих при частичной разгерметизации сливных приборов по причине механических, либо химических воздействий [10, 11]. В этой связи, вопрос минимизации уязвимости сливных приборов не только злободневен, но и требует альтернативного подхода.

Основн ая час ть

Перевозка нефтепродуктов, связующая этапы отгрузки и выгрузки, осуществляется в специализированных вагонах-цистернах. Эксплуатация такого вида подвижного состава должна производиться в исправном техническом состоянии [12] и в соответствии с техническими условиями [13], установленными для обеспечения безопасности при перевозках.

В то же время ОАО РЖД открыто признается о необходимости увеличения надежности узлов грузовых вагонов, а также совершенствования их конструкции [14], в том числе и донного клапана.

В свою очередь донный клапан цистерны – очаг аварийности. Постоянное воздействие неблагоприятных факторов при транспортировке нефтепродуктов, их агрессивность и наложение длительных простоев цистерн значительно снижают их эксплуатационный ресурс [15] и, как следствие, количество исправных циклов по их открытию/закрытию в рамках выгрузочных операций. Это приводит к внезапному нарушению герметизирующей способности донной арматуры и капельным течам, которые актуальны до сих пор. Например, 19 января 2018 года такая течь возникла по сливному прибору железнодорожной цистерны на станции Косяковка, расположенной в г. Самаре Самарской области [16].

В ликвидации течи было задействованы значительные силы в объеме 28 человек и 6 единиц техники.

Показательными также являются отчетные данные по Волгоградскому региону, на территории которого зафиксировано 9 утечек нефтепродуктов, 5 из которых произошли через нижний клапан сливного прибора [17].

Еще одним из аналогичных примеров отмечается инцидент на станции Тамала Пензенской области, где течь возникла также из сливного прибора цистерны [18].

Несмотря на многочисленную работу, проведенную в направлении поиска ключевых причин таких течей, вывод остается одним – проблема является комплексной.

Здесь играет роль возраст железнодорожных цистерн, климатические условия их эксплуатации, а также исполнение обязательств вагонного хозяйства и собственников цистерн по их своевременному техническому обслуживанию.

Также из практики отмечаются и случаи длительных простоев железнодорожных цистерн с нефтепродуктом на объектах их приема, хранения и выдачи. Систематическое использование цистерн в качестве резервуаров длительного хранения создает условия для разрушающего воздействия, оказываемого на донную арматуру за счет агрессивности среды.

Основными механизмами таких воздействий, приводящих к снижению эксплуатационных свойств сливных приборов, это в первую очередь, коррозия донного клапана, либо седла.

Под корродирующим воздействием происходит утончение металла, а также образование рытин, за счет чего снижается степень плотности прилегания элементов друг к другу.

Другой стороной влияния выступает человеческий фактор, выраженный в постоянном воздействии эксплуатационного персонала на конструкцию донной арматуры.

Низкий уровень подготовки, а также незнание технических особенностей эксплуатации арматуры приводит к ее повреждению.

Зачастую это характерно для участков отгрузки и выгрузки, работники которых напрямую выполняют технологические операции по открытию и закрытию клапанов.

Здесь также необходимо вновь прибегнуть к практическому опыту, в рамках которого отмечены чрезмерные усилия по затягиванию клапана при его закрытии, а также физическое воздействие при операциях с «проблемными» клапанами, которые не поддаются штатному открытию по ряду причин (залипание, примерзание).

Частой ошибкой здесь являются попытки персонала прибегнуть к увеличению плеча ключа донного клапана, что приво-

дит к перелому штока донного клапана (рис. 1).

При этом даже в случае сохранения визуальной целостности штока, практически не исключена его деформация за счет смещения угла воздействия от увеличения плеча. Таким образом, в результате скручивания и излома штока, он приобретает форму лопасти, которая делает невозможным дальнейшее герметичное закрытие клапана.

На основании вышеизложенного можно заключить, что отказ донной арматуры с последующим выходом нефтепродукта – всего лишь вопрос времени.

Мы полагаем, что решение обозначенной проблемы возможно через дублирование запорного элемента, обеспечивающего страховку от аварийных разливов,

возникающих на этапе следования. При этом решение не должно повторять имеющихся недостатков существующей донной арматуры железнодорожных цистерн.

Предлагаемым методом защиты окружающей среды от несанкционированных разливов нефтепродуктов, возникающих в пути следования, является пневматическое запорное устройство сливного прибора железнодорожной цистерны (далее – ПЗУ) изображенное на рис. 2 [19].

ПЗУ состоит из пневмозаглушки, выполненной в виде цилиндрической оболочки из маслобензостойкой, прорезиненной ткани и линии подачи воздуха, оборудованной шаровым краном, которые соединены между собой посредством сквозного фитинга, вмонтированного в корпус донного клапана.



Рис. 1. Пример перелома верхней части штока донного клапана железнодорожной цистерны
Fig. 1. Example of fracture of the upper part of the bottom valve stem of a railway tank

Работа ПЗУ заключается в следующем: после отгрузки (налива) нефтепродукта в вагон-цистерну (поз. 1) и проверки отсутствия течи из нижнего патрубка сливного прибора (поз. 2), персонал приводит ПЗУ в рабочее состояние путем заполнения пневмозаглушки (поз. 3) техническим воздухом, подаваемым от штатного источника (компрессора) через линию (поз. 4), которые соединены между собой жесткой сцепкой с одной стороны и гибкой с другой через сквозной фитинг (поз. 5), вмонтированный в донный клапан сливного прибора (поз. 6).

Рабочее давление накачивания пневмозаглушки можно определить исходя из

значения, рекомендуемого для заглушек, по формуле:

$$P_{пз} = 1,5 \times P_{сп}, \quad (1)$$

где $P_{пз}$ – давление пневмозаглушки, кгс/см²; $P_{сп}$ – давление сливного прибора, кгс/см².

Согласно исследованиям [20], максимальное давление, создаваемое в сливном приборе соответствует гидростатическому давлению столба нефтепродукта и составляет 0,2 кгс/см². Тогда, используя приведенную формулу, рабочее давление пневмозаглушки будет приближено к данному значению и составлять 0,24 кгс/см².

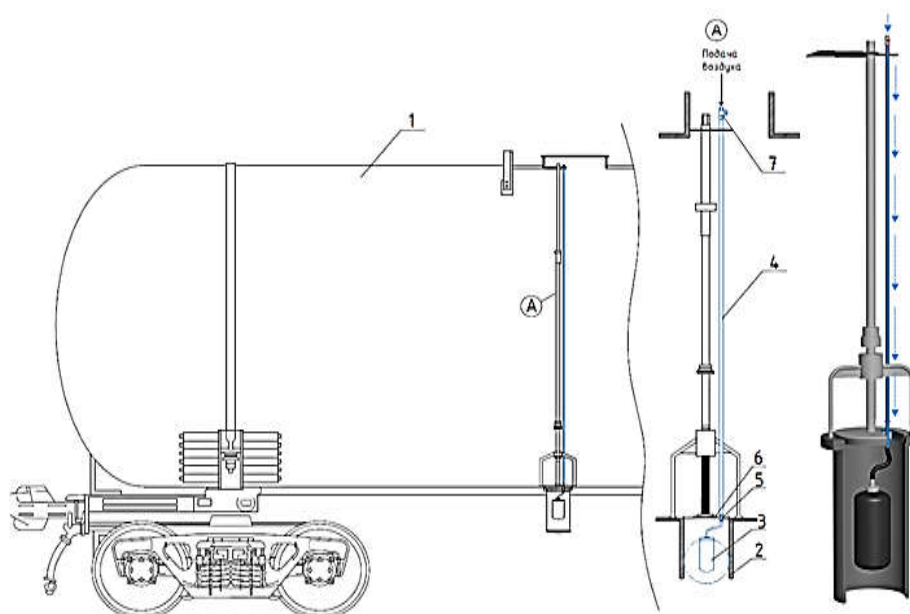


Рис. 2. Пневматическое запорное устройство железнодорожной цистерны
Fig. 2. Pneumatic locking device of a railway tank

При создании такого давления, внутри оболочки пневмозаглушки, происходит его расширение и соответственно герметизация сливного патрубка по принципу тампонирования.

После подачи железнодорожной цистерны под фронт отгрузки персонал, выполнив все необходимые подготовительные мероприятия перед сливом, открывает шаровой кран (поз. 7) и выпускает воздух из системы, спуская при этом пневмозаглушку, и производит открытие данного клапана (поз. 6), который поднимается одновременно вместе с закрепленной на нем пневмозаглушкой, освобождая тем самым проходное сечение патрубка для дальнейшего выполнения слива нефтепродукта.

Немаловажным является и расчет толщины стенки пневмозаглушки, которую можно определить по формуле:

$$\delta = \frac{P_{пз} \times D}{2 \times \sigma} \quad (2)$$

где $P_{пз}$ – давление пневмозаглушки, (0,25 кгс/см²); D – диаметр сливного патрубка, мм; σ – допустимое напряжение материала пневмозаглушки (для резины ~ 5...10 МПа).

В рамках расчета примем диаметр патрубка D равный 300 мм, а также возьмем среднее значения напряжений σ . В

результате чего получаем толщину стенки пневмозаглушки около 5 мм.

Следующим значимым параметром является габаритные размеры пневмозаглушки, определяемые площадь тампонирования. Расчётную длину данного элемента определим по аналогии с трубопроводами, заглушки для которых подбираются по следующему условию:

$$L \geq 1,5D \quad (3)$$

где L – длина пневмозаглушки, мм; D – диаметр сливного патрубка, мм

Таким образом, длина пневмозаглушки должна составлять 450 мм для требуемого обеспечения герметичности.

Однако диапазон технических параметров рабочего элемента ПЗУ может различаться в зависимости от типоразмеров цистерн, а также перевозимого груза, поэтому представим расчётные данные с расхождениями в таблице.

Таким образом, можно сделать вывод, что характеристики пневмозаглушек для ПЗУ могут отличаться и зависят от перевозимого топлива, в частности его плотности, которая влияет на давление создаваемое столбом жидкости и в дальнейшем определяет степень воздействия на пневмозаглушку.

Таблица

Диапазон расчётных параметров пневмозаглушек пневматического запорного устройства

Table

The range of design parameters of pneumatic plugs of the pneumatic locking device

Устройство	$P_{пз}$, кгс/см ²	δ , мм	L, мм	Вид перевозимого продукта
ПЗУ № 1	0,2	≥ 3	450	Керосин, Бензин, Дизельное топливо, МТБЭ
ПЗУ № 2	0,5	5	525	-//-
ПЗУ № 3	0,7	7	525	-//-
...	Иные виды нефтепродуктов

Преимуществом заявляемого решения является его надежность, достигаемая за счет отсутствия воздействия вибрационных и других физико-химических факторов на состояние герметичности, как в случае с донной арматурой.

Наряду с этим, данное устройство расширяет техническую возможность опо-

рождения вагонов-цистерн с неисправным донным клапаном штатным способом нижнего слива без необходимости применения средств верхнего аварийного слива. Демонстрация пневмозаглушки ПЗУ в рабочем состоянии представлена на рис. 3.

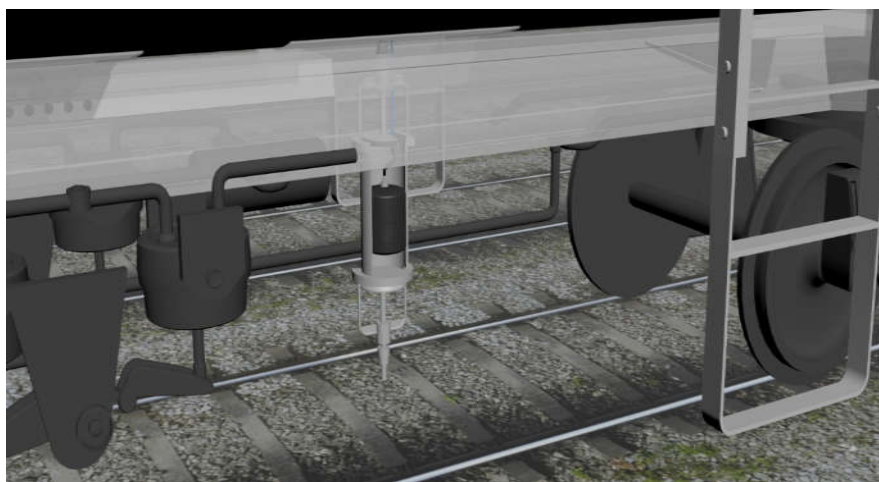


Рис. 3. Модель пневмозаглушки ПЗУ в рабочем состоянии пневматического запорного устройства

Fig. 3. The model of the ROM pneumatic plug in the working state of the pneumatic locking device

Заключение

В работе проанализирован существующий уровень аварийности железнодорожного транспорта нефтепродуктов в рамках этапа следования грузов от мест их отгрузки до участков выгрузки.

Установлена актуальность проблемы несанкционированных разливов, возникающих в пути следования нефтепродуктов, при этом большая часть таких разливов происходит через нижний сливной прибор железнодорожных цистерн, являющийся наиболее уязвимым узлом рассматриваемого подвижного состава.

На основе анализа и практического опыта выявлено, что основными причинами снижения надежности сливных приборов является влияние физико-химических свойств перевозимых нефтепродуктов на материал устройств, отсутствие должного внимания к техническому обслуживанию и своевременному переоборудованию цистерн, а также наиболее влияющий человеческий фактор, выраженный в ошибках персонала при эксплуатации сливной системы.

В целях увеличения надежности сливных приборов железнодорожных цистерн для перевозки нефтепродуктов и одновременного снижения рисков их несанкционированных разливов в пути следования предлагается применение дублирующего запорного устройства, устанавливаемого в патрубке сливного прибора и основанного на принципе тампонирувания.

За счет пневматического элемента предлагаемого устройства обеспечивается необходимая степень герметизации сливного патрубка, не допуская выход нефтепродукта наружу в случае потери герметичности донного клапана.

При этом, путем физических особенностей, решение не может потерять своих эксплуатационных свойств в результате воздействия агрессивности среды, механических воздействий, возникающих в пути следования, а также человеческого фактора.

Предлагаемое решение позволит повысить экономическую эффективность перевозок за счет сохранности грузов, а также обеспечит защиту окружающей среды от загрязняющего воздействия в результате несанкционированных разливов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Султанов, Р. М. Прогнозирование чрезвычайных ситуаций при транспортировке нефтепродуктов железнодорожным транспортом / Р. М. Султанов, Л. А. Ибатуллина // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. № 1(107).
2. Ли, Я. Анализ рисков транспортировки нефтепродуктов из России в Китай / Я. Ли // Экономические науки. 2018. № 160. С. 37-40.
3. Никулин, А. А. Подходы к прогнозированию негативного влияния железнодорожного транспорта на окружающую среду / А. А. Никулин, М. В. Медов, Р. В. Кошкарров // Universum: технические науки. 2021. № 4-1(85). С. 18-22.
4. New Report: Concerns Remain Over Safety of Rail to Transport Energy Liquids and Gases [Электронный ресурс] режим доступа: <https://www.nationalacademies.org/news/2017/10/concerns-remain-over-safety-of-rail-to-transport-energy-liquids-and-gases> (дата обращения: 15.01.2024).
5. Safety in the Transportation of Oil and Gas: Pipelines or Rail? [Электронный ресурс] режим доступа: <https://www.fraserinstitute.org/sites/default/files/safety-in-the-transportation-of-oil-and-gas-pipelines-or-rail-rev2.pdf> (дата обращения: 17.01.2024).
6. Акимов, В.А. Риски транспортировки опасных грузов / В.А. Акимов, Ю. И. Соколов; Акимов В.А., Соколов Ю.И., 2011 © МЧС России, 2011 © ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2011. Москва, 2011. 276 с.
7. Седов, Д. В. О смягчении последствий аварий при перевозке нефти и нефтепродуктов по железной дороге / Д. В. Седов // Национальная Ассоциация Ученых. 2015. № 3-3(8). С. 124-128.
8. Пономарев, В. М. Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте / В. М. Пономарев, А. И. Шевченко // Наука и техника транспорта. 2005. № 2. С. 40-46.
9. Пахомова, А. О. Проблематика утечки опасных грузов при транспортировке в вагонах-цистернах / А. О. Пахомова, Е. Н. Давыдова // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2024. Т. 1. С. 31-35. – EDN WYUWDG.
10. Катин, В. Д. Повышение безопасности перевозки железнодорожным транспортом нефти и нефтепродуктов / В. Д. Катин, А. Н. Луценко // Вестник института тяги и подвижного состава. 2018. № 14. С. 13-15.
11. Пелех, М. Т. Взаимодействие различных подразделений обеспечения пожарной безопасности при перевозке нефтепродуктов по железным дорогам / М. Т. Пелех, А. В. Галич // Транспортное планирование и моделирование: Сборник трудов V Международной научно-практической онлайн-конференции, Москва, 16–17 апреля 2020 года. – Москва: Российский университет транспорта, 2020. С. 32-41.
12. Приказ Министерства транспорта РФ от 29 июля 2019 г. № 245 «Об утверждении Правил перевозок железнодорожным транспортом грузов наливом в вагонах-цистернах и вагонах бункерного типа для перевозки нефтебитума» (Зарегистрирован 07.02.2020 № 57458).
13. ГОСТ 10674-2022. Вагоны-цистерны. Общие технические условия. Межгосударственный стандарт: утв. и введ. в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27.12.2022 г. № 1616-ст. Дата введения 2024-06-01/ подготовлен ООО "ВНИЦТТ". М.: Стандартиформ, 2022. 34 с.;
14. О стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года (утв. Распоряжением Правительства РФ от 17.06.2008 №877-р) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=155> (дата обращения: 10.05.2024)

15. Современные подходы к донной арматуре слива железнодорожных цистерн / С. Л. Горобченко, Д. А. Ковалев, А. В. Теппов [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 5. С. 396-405. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-5-396-397. – EDN DIPZJL.
16. Капельная течь бензина на станции Косяковка [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ecospas.ru/chrezvychainye-situatsii/kapelnaya-tech-benzina-na-stancii-kosyakovka> (дата обращения: 02.04.2025).
17. Почему текут цистерны? [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://gudok.ru/zdr/174/?ID=1339649> (дата обращения: 02.04.2025).
18. В Пензенской области ликвидированы последствия утечки нефтепродуктов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.rzd-partner.ru/other/news/374346/>

- partner.ru/other/news/374346/ (дата обращения: 02.04.2025).
19. Патент на полезную модель № 224567 U1 Российская Федерация, МПК B61D 5/00, B65D 90/12, B65D 88/06. Пневматическое запорное устройство сливного прибора железнодорожного вагона-цистерны : № 2023129022 : заявл. 08.11.2023 : опубл. 28.03.2024 / О. С. Кузьмин, А. Н. Луценко; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения». – EDN BOPBLO.
20. Кузьмин, О. С. Совершенствование отгрузочно-го этапа транспортировки нефтепродуктов железнодорожным транспортом в целях повышения безопасности и защиты окружающей среды / О. С. Кузьмин, А. Н. Луценко, Е. С. Куликова // Транспортное дело России. 2024. № 1. С. 189-192. – EDN CFXXKU.

REFERENCES

1. Sultanov RM, Ibatullina LA. Forecasting of emergency situations during transportation of petroleum products by rail. Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2017;1(107).
2. Li Ya. Analysis of the risks of transporting petroleum products from Russia to China. Economic Sciences. 2018;160:37-40.
3. Nikulin AA, Medov MV, Koshkarov RV. Approaches to forecasting the negative impact of railway transport on the environment. Universum: Technical Sciences. 2021;4-1(85):18-22.
4. New Report: Concerns Remain Over Safety of Rail to Transport Energy Liquids and Gases [Internet]. [cited 2024 Jan 15]. Available from: <https://www.nationalacademies.org/news/2017/10/concerns-remain-over-safety-of-rail-to-transport-energy-liquids-and-gases>
5. Safety in the Transportation of Oil and Gas: Pipelines or Rail? [Internet]. [cited 2024 Jan 17]. Available from: <https://www.fraserinstitute.org/sites/default/files/safety-in-the-transportation-of-oil-and-gas-pipelines-or-rail-rev2.pdf>
6. Akimov VA, Sokolov YuI. Risks of transportation of dangerous goods. Moscow; 2011.
7. Sedov DV. On mitigating the consequences of accidents during the transportation of oil and petroleum products by rail. The National Association of Scientists. 2015;3-3(8):124-128.
8. Ponomarev VM, Shevchenko AI. Prevention and elimination of emergency situations in railway transport. Science and Technology in Transport. 2005;2:40-46.
9. Pakhomova AO, Davydova EN. The problem of leakage of dangerous goods during transportation in tank cars. Scientific, Technical and Economic Cooperation of the Asia-Pacific Countries in the 21st Century. 2024;1:31-35.

10. Katin VD, Lutsenko AN. Improving the safety of transportation of oil and petroleum products by rail. Vestnik Instituta Tyagi I Podvizhnogo Sostava. 2018;14:13-15.
11. Pelekh MT, Galich AV. Interaction of various fire safety departments during transportation of petroleum products by rail. Proceedings of the V International Scientific and Practical Online Conference, April 16-17, 2020: Transport Planning and Modeling; 2020.
12. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation. On approval of the rules for railway transportation of bitumen bulk cargo in tank cars and bunker-type cars. 2019 July 29.
13. GOST 10674-2022. Tank cars. General specifications. Moscow: Standartinform; 2022.
14. On the strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030 [Internet]. [cited 2024 May 10]. Available from: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=155>
15. Gorobchenko SL, Kovalev DA, Teppoev AV. Modern approaches to bottom fittings for draining railway tanks. Izvestiya Tula State University. Technical Sciences. 2024;5:396-405. DOI 10.24412/2071-6168-2024-5-396-397.
16. Gasoline drip at Kosyakovka station [Internet]. [cited 2025 April 02]. Available from: <https://www.ecospas.ru/chrezvychainye-situatsii/kapelnaya-tech-benzina-na-stancii-kosyakovka>
17. Why do the tanks leak? [Internet]. [cited 2025 April 02]. Available from: <https://gudok.ru/zdr/174/?ID=1339649>
18. The consequences of the leakage of petroleum products have been eliminated in the Penza region [Internet]. [cited 2025 April 02]. Available from: <https://www.rzd-partner.ru/other/news/374346/>

19. Kuzmin OS, Lutsenko AN. RF Utility Model Patent No. 224567 U1 МПК В61D 5/00, В65D 90/12, В65D 88/06. Pneumatic locking device of the drain device of a railway tank car. 2024 March 28.

20. Kuzmin OS, Lutsenko AN, Kulikova ES. Improvement of the shipping stage of transportation of petroleum products by rail in order to improve safety and environmental protection. Transport Business of Russia. 2024;1:189-192.

Информация об авторах:

Кузьмин Олег Сергеевич – аспирант кафедры «Техносферная безопасность», Author ID РИНЦ 1087908, тел. +79963898395.

Луценко Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная безопасность», Author ID РИНЦ 860647.

Куликова Елена Сергеевна – старший преподаватель ВШ «Транспортного строительства, земле-

устройства и геодезии», Author ID РИНЦ 222668, тел. +79625001403.

Антонычева Елена Альбертовна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика и теоретическая механика», Author ID РИНЦ 609075.

Kuzmin Oleg Sergeevich – Postgraduate Student at the Department of Technosphere Safety, Author ID RSCI 1087908, phone: +79963898395.

Lutsenko Andrey Nikolaevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technosphere Safety, Author ID RSCI 860647.

Kulikova Elena Sergeevna – Senior Lecturer at the Higher School of Transport Construction, Land Man-

agement and Geodesy, Author ID RSCI 222668, phone: +79625001403.

Antonycheva Elena Albert ovna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics and Theoretical Mechanics, Author ID RSCI 609075.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 29.04.2025; одобрена после рецензирования 30.05.2025; принята к публикации 26.06.2025. Рецензент – Нагоркин М.Н. доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета.

The article was submitted to the editorial office on 29.04.2025; approved after review on 30.05.2025; accepted for publication on 26.06.2025. The reviewer is Nagorkin M.N., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University.

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.463.32

doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-72-80

ОБЗОР КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ВАГОНОВ-ЦИСТЕРН

Игорь Валентинович Плотников¹, Геннадий Иванович Петров², Павел Андреевич Карачевский³✉

^{1,2,3} Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия

¹ plot710@gmail.com

² petrovgi@gmail.com

³ pavel.karachevsky@inbox.ru; <https://orcid.org/0009-0003-1944-6256>

Аннотация

Цель исследования заключается в определении перспективного направления развития в цистерностроении. Для достижения поставленной задачи необходимо выполнить анализ уже существующих технических решений, а также рассмотреть тенденции и ограничения в развитии отечественного парка цистерн и особенно важно рассмотреть конструктивные исполнения используемых за рубежом.

В ходе работы представлен результат сбора и последующего анализа данных по конструктивным особенностям и техническим решениям, применяемых за границей. При работе с полученными данными, определен наиболее рациональный вариант конструкции, требующий более детальной проработки конкретных узлов при помощи методов компьютерного моделирования.

Ключевые слова: котел, цистерна, безрамная, торцевые щиты, дуги, шпангоут.

Ссылка для цитирования:

Плотников И.В. Обзор конструктивных особенностей вагонов-цистерн / И.В. Плотников, Г.И. Петров, П.А. Карачевский // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 7. – С. 72-80. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-72-80.

Original article

Open Access Article

OVERVIEW OF THE DESIGN FEATURES OF TANK CARS

Igor Valentinovich Plotnikov¹, Gennadiy Ivanovich Petrov², Pavel Andreevich Karachevsky³✉

^{1,2,3} Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

¹ plot710@gmail.com

² petrovgi@gmail.com

³ pavel.karachevsky@inbox.ru; <https://orcid.org/0009-0003-1944-6256>

Abstract

The study objective is to determine the promising direction of developing tank engineering. To achieve this goal, it is necessary to analyze existing engineering solutions, as well as consider trends and limitations in the development of domestic tank fleet, and it is especially important to consider designs used abroad.

During the study, the result of the collecting and subsequent analysis of data on design features and en-

gineering solutions used abroad is presented. When working with the obtained data, the most rational design option was determined, requiring a more detailed study of specific nodes using computer modeling methods.

Keywords: boiler, tank, frameless, end shields, arches, bulkhead.

Reference for citing:

Plotnikov IV, Petrov GI, Karachevsky PA. Overview of the design features of tank cars. Transport Engineering. 2025;7:72-80. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-72-80.

Введение

Конструкция вагонов по мере развития железнодорожного транспорта зависела от технологических методов изготовления, длины цеха, возможностей и уровня научного развития, а также методов проектирования.

Все это на протяжении длительного исторического периода совершенствовалось и модернизировалось, так или иначе были как удачные технические решения, так и не удачные. Эти решения подвергались серьезным испытаниям и длительным циклам эксплуатации, собрав весь опыт вагоностроения можно выделить несколько тенденций в развитии. Направления развития были сконцентрированы вокруг

Методы

Методики, на которых базируется данная работа, представляют собой теоретические и эмпирические составляющие. Использование в качестве объектов для анализа, существующие решения, представленные в виде: патентов; отечественной и зарубежной литературы; норматив-

Обзор конструктивных решений

Первые вагоны для железной дороги направления из Санкт-Петербурга в Царское Село представляли собой совокупность двухосных платформ, на которых устанавливались кареты или скамейки для пассажиров. По существу, конструкция представляла собой вагон, на который устанавливалось всё что угодно. Такой подход определил, что при создании вагонов для перевозки жидких грузов в качестве базового варианта необходимо использовать платформу с размещением на неё резервуара. Размеры данного резервуара ограничивались технологическими возможностями получения металла для изготовления и способа соединения этого металла между собой. Практически до 50-х годов прошлого века широко применялись котлы цистерн, изготавливаемые методом клёпки отдельных листов между собой. Вместе с тем следует отметить, что по мере развития ж. д. транспорта на первых этапах впервые в технологии железнодо-

основных параметров: геометрических размеров (длиннобазные, стандартные); количество осей (от двух до восьми); тип перевозимого груза (опасные, пищевые, мелкодисперсные). Учёт каждого из параметров накладывал свои технические требования и технологию изготовления.

Важность разработки конструкции цистерны, которая обеспечит предотвращение повреждения оболочки ценой защитных средств, обуславливается серьезными последствиями крушений при перевозке опасных грузов, приводящих к заражению окружающей среды на долгие годы.

ных документов, позволяет при помощи сравнения оценить и выявить наилучшие параметры и технические решения. Результаты необходимо синтезировать с учётом лучших параметров для дальнейшего проектирования и моделирования.

рогожного транспорта была применена электросварка по методу Бендароса [6]

Размеры сосуда, перевозящего жидкие опасные грузы базировались на ограниченных величинах осевых и погонных нагрузках. Практически до 60-х годов широко применялись двухосные цистерны с осевой нагрузкой, не превышающей 15-16 тонн. Широкое развитие локомотивного семейства тепловозов и электровозов в нашей стране позволило перейти на массовое изготовление четырёхосных вагонов с осевой нагрузкой 20-22 тонны.

В свою очередь вагоностроительные предприятия, которые занимались изготовлением цистерн в угоду крупносерийной специализации определённых узлов, по существу, оставили неизбежным производство конструкций, представляющих собой версию, существующую ранее – котла, установленного на раму. В этой связи в 60-х годах начались работы по увеличению осевых и погонных нагрузок с одновременным переходом на увеличение

габариты подвижного состава (ПС). В это же время происходили изменения в структуре грузооборота, увеличилась доля светлых нефтепродуктов и для мероприятий по увеличению веса поезда были начаты работы по созданию шести и восьмиосных цистерн.

Увеличение габаритов позволило увеличить диаметр и длину котла, что было успешно реализовано в моделях восьмиосных цистерн моделей 871 и 880 (рис. 1, 4).

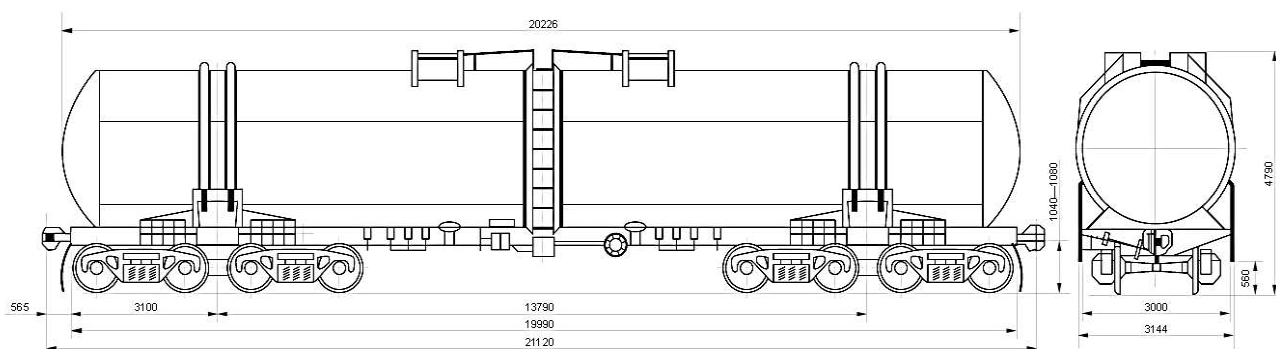


Рис. 1. Восьмиосная цистерна для нефтепродуктов модели 15-871
Fig. 1. Eight-axle tanker for petroleum products model 15-871

Суммируя более чем десятилетний опыт проектирования и эксплуатации первых восьмиосных цистерн позволило создать серийный образец, имеющий кольцевые элементы жесткости – шпангоуты, применяемые и на более ранних моделях (871, 880), но отличие данной модели было в использовании шпангоутов переменного сечения по окружности котла, что было сделано впервые в мировой практике. Такие решения позволили при габарите «1-Т» иметь диаметр котла 3,2 м. с грузоподъемностью до 125 т. при массе 51 т. (рис. 3).

Важным вопросом в развитии конструкций восьмиосных вагонов, была ходовая часть. Разработка отдельной 4-х осной тележки, накладывал на себя большой объем работ, так было принято решение о создании специальной соединительной балки, позволяющей опираться на две стандартные двухосные тележки (рис. 2).

Первые варианты соединительных балок были массивные, что увеличивало тару вагона. Развитие конструкций соединительных балок было нацелено на компактное расположение тормозного оборудования и уменьшение веса соединительной балки. Дальнейшие разработки были направлены на совершенствование кузова,

такой тип конструкции исключал соединительную балку, т. о. кузов через опорное устройство передавал нагрузку на тележку [2].

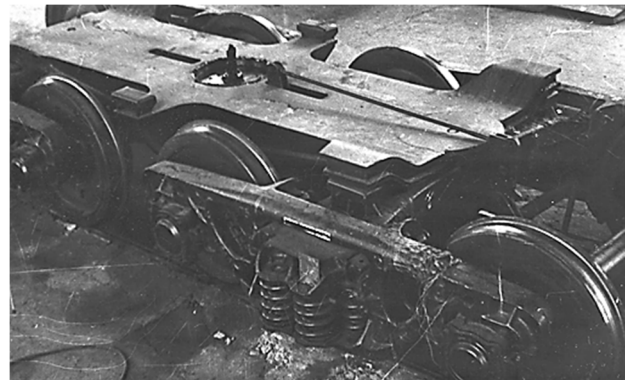


Рис. 2. Четырехосная тележка со штампо-сварной соединительной балкой
Fig. 2. Four-axle trolley with die-welded connecting beam

Эксплуатация таких цистерн предполагала решение проблемы, связанной с изменением сливо-наливных эстакад для обеспечения сплошного перекрытия фронта слива и налива, однако противником этого направления развития являлись организации, производившие такие работы и вагоностроительная промышленность, у которой было налажено производство классических рам для цистерн.

Это было связано с размерами цеха равными 12 м., поэтому в качестве базового варианта была принята четырёхосная

цистерна с длиной по осям сцепления равным 12,02 метра и базой 7,8 метра.

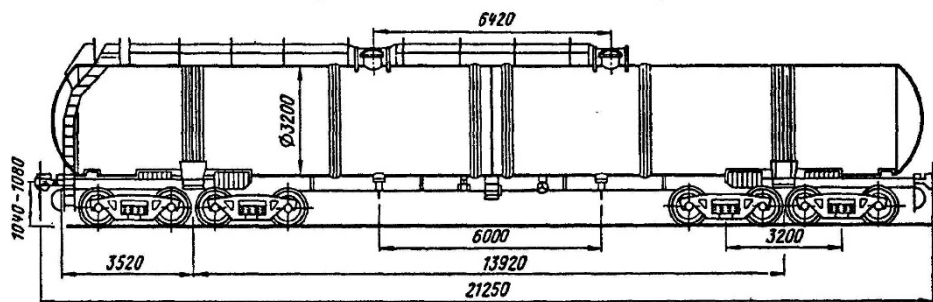


Рис. 3. Восьмиосная цистерна для нефтепродуктов модели 15-1500
Fig. 3. Eight-axle tanker for petroleum products model 15-1500

На раму такой платформы можно было ставить почти любой котёл. Такой подход, по нашему мнению, был определённым тормозом в вагоностроении, и не смотря на весьма высокую эффективность восьмиосных вагонов к двухтысячным годам их производство было свёрнуто. Увеличение диаметра котла цистерн приводит

ло, как правило, к увеличению положения центра тяжести, что ухудшало динамические свойства вагона при определённых скоростях, так, например, восьмиосная цистерна, создававшаяся для Байкало-Амурской магистрали в габарите «Т» имела ограничения по максимальной скорости (рис. 4).

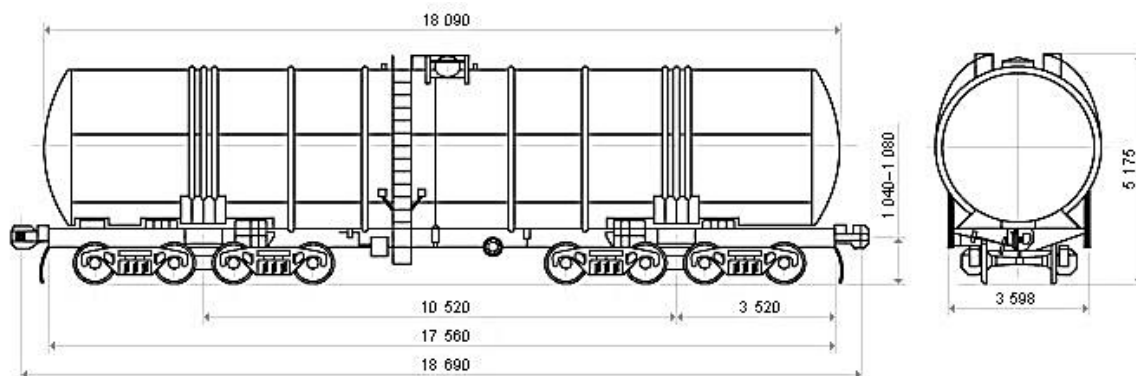


Рис. 4. Восьмиосная цистерна для нефтепродуктов модели 15-880
Fig. 4. Eight-axle tanker for petroleum products model 15-880

Сохранение двух элементов (котла и рамы), которые можно менять между собой на первый взгляд задумано верно, но в действительности оказалось по-другому. В 70-х годах было установлено, что в эксплуатации возникали случаи возникновения аварийных ситуаций, связанных с пробоем котла на сортировочных горках из-за превышения скоростей соударения. Возникает необходимость в создании специализированных защитных устройств, защищающих торцевые зоны цистерн и верхнюю зону сливо-наливной арматуры. Появление вариантов различных средств за-

щиты, приводят к увеличению массы тары и снижению эффективности.

Проводившиеся в 70-х и 80-х годах тщательные исследования прочностных свойств цистерн различного типа, позволило определить, что элементы котлов (сосудов) в различных зонах имеют различное напряжённо деформированное состояние. Эти результаты позволили спроектировать и начать серийное производство котлов для перевозки сжиженных газов с дифференцированными толщиной оболочки (рис. 5) [1].

Исходя из этого можно найти зоны менее нагруженные и перераспределить металл для использования его при создании средств защиты. В 70-х годах проводились исследования по созданию нескольких модификаций четырёхосных безрамных цистерн.

стерн. Были изготовлены и испытаны опытные образцы для различных видов грузов, но к серийному производству их не приняли в связи с отличием по длине от серийно выпускаемых цистерн.



Рис. 5. Опытная восьмиосная безрамная цистерна для сжиженного газа (аммиака)
Fig. 5. Experimental eight-axle frameless tanker for liquefied gas (ammonia)

Главный критерий, препятствующий широкому внедрению, служил факт того, что при возникновении аварийных ситуаций, связанных с ударами и сходами, достаточно просто заменить либо раму, либо котёл, что, по нашему мнению, является ошибочным тезисом. Проводившиеся в МИИТе комплекс работ по исследованию процессов аварийных режимов возникающих при перевозке жидких грузов в различных типах цистерн позволило определить условные аварийные режимы и нормировать условные расчётные силовые параметры при возникновении аварийных режимах [3]. Известны технические решения, применяемые на территории нашей страны, так, например, для защиты цистерн от пробоев уже упоминавшийся торцевые щиты, ограничители саморасцепа и дуги безопасности для защиты сливоналивной арматуры. Работы в этом направлении велись в 80-х годах в МИИТе [4, 5].

Установка торцевых защитных экранов производилась непосредственно на раму вагона, что по-нашему мнению не очень рационально, продольные нагрузки передавались через лапы, обеспечивающие крепление котла на раме. Котёл в центре берёт на себя всю нагрузку, а за счёт опирания кола на деревянные брусья, он начинает кивать. Между торцевой защитой

и котлом находится зазор для поглощения энергии, проблема заключается в лапах, наиболее уязвимым местом оказалось крепление котла к раме. При этом было выяснено, что продольные нагрузки передаются через ограниченную длину сварных швов, получается так, что защищается торцевая часть котла, но при этом из-за больших напряжений котёл раскалывается пополам (рис. 6).

Если рассматривать развитие цистерн за пределами страны, то можно акцентировать внимание на парк железнодорожных цистерн США, так как они ближайшие по объёму перевозок. Так на протяжении второй половине XX века, американские железные дороги обладали большими производственными мощностями, что позволяло выпускать большой объём грузовых вагонов, но при всех возможностях такой объём выпускать не удавалось. В США грузовой парк развивался через повышение осевых нагрузок. В то время, когда на железных дорогах СССР осевая нагрузка составляла 21 т/ось, в США осевые нагрузки достигала порядка 28 т/ось, так уже в 70-х годах грузоподъемность цистерн для перевозки пропана составляла 50 т., стоит отметить что данные цистерны были безрамные с длиной по осям сцепления 11,07 м (рис 7.)

Важно отметить, что на тот момент парк безрамных 4-осных цистерн составлял порядка 27 % от общего числа возможных конструктивных исполнений. Из обязательных средств защиты использо-

вался лишь предохранительный клапан, а сливноналивная арматура представляет собой лишь обслуживающую площадку с лестницей [8].

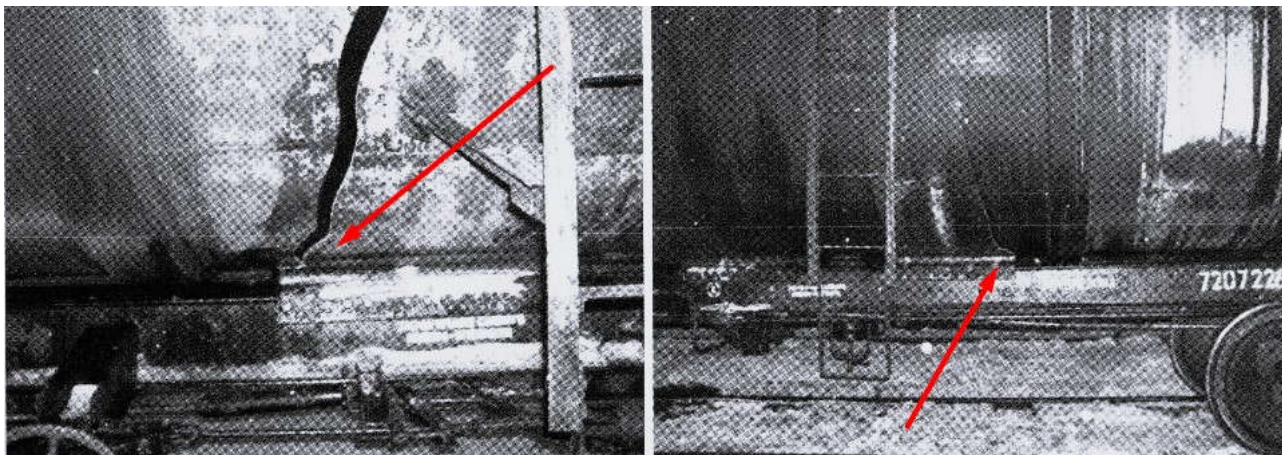


Рис. 6. Излом и трещина котла цистерны в местах крепления к раме
Fig. 6. Fracture and crack of the tank boiler at the attachment points to the frame

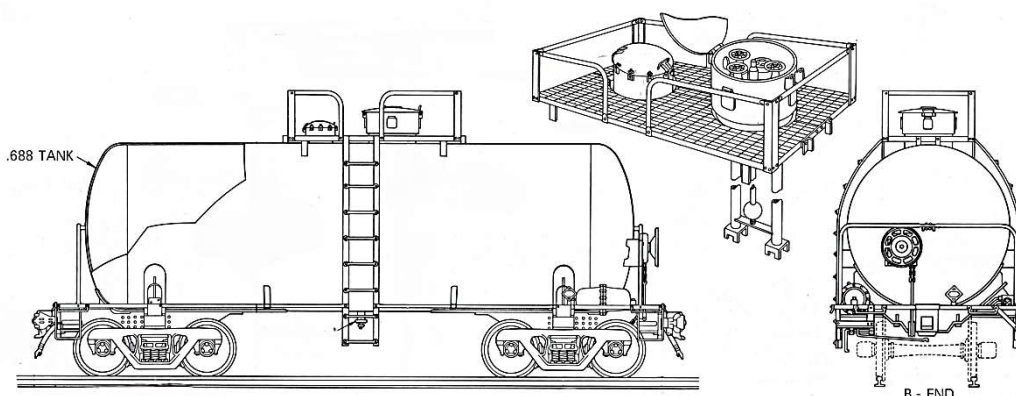


Рис. 7. Безрамная цистерна типа Dot-114A34W (США)
Fig. 7. Frameless tank type Dot-114A34W (USA)

Также встречались исполнения рамных цистерн с использованием массивных торцевых стенок, необходимых для защи-

ты котла от пробоя. Такой вид защиты имеет недостаток, связанный с сильным увеличением тары вагона (рис. 8) [9].



Рис. 8. Американская цистерна, снабжённая торцевыми стенками.
Fig. 8. American tank equipped with end walls

По мере развития зарубежного вагоностроения, инженеры конструкторы совместно с научными работниками, представили ограничители от саморасцепа, которые используются и по сей день. Они представляют из себя планку, расположенную либо с низу, либо с обеих сторон автосцепки, при превышающих допустимых значениях возвышения, планка упирается в другую автосцепку, поднимая её за собой, что не даёт им разъединиться.

Вопросами защитного оборудования для цистерн, задавались и европейские страны, так в Польше производились цистерны с применением защитных устройств: торцевых щитов; дуг безопасности; устройств от саморасцепа. Стоит отметить, что крепление цистерны поль-

ской разработки, хоть и имела средства защиты, но все так же крепилась в центральной части рамы, последствия такого крепления уже были рассмотрены выше.

Помимо США и разработками по безрамным цистернам велись в Китае, они также пытались реализовать безрамную конструкцию. Она представляла собой крепление котла к двум полурамам, само крепление имело несколько особенностей, в отличии от использования лежней и коробчатой опоры, применяемой на отечественных цистернах, тут используется толстенная листовая опора, помимо таких опор котёл крепят в зоне днища. Стоит отметить так же отсутствие какой-либо защиты днища цистерны от пробоя или защиты сливоналивной арматуры (рис. 9.)



Рис. 9. Безрамная цистерна производства Китая
Fig. 9. Frameless tank made in China

Решая вопрос создания безрамных цистерн Китай предлагает свой вариант конструкции, но как можно увидеть котёл состоит из порядка шести колец, сваренных вместе, что является серьёзной ошибкой. Каждый сварной шов представляет собой концентратор напряжений и требует к своему исполнению соблюдение технологии и последующего контроля, а также высокую квалификацию сварщика. Миними-

зация таких узлов обеспечит высокую надёжность конструкции.

При том, что в конструкции отсутствует рама, продольные нагрузки будет воспринимать котёл, для его усиления необходимо применить шпангоуты, показавшие высокую эффективность при проектировании отечественных восьмиосных цистерн.

Заключение

Вопросы безопасности на железнодорожном транспорте всегда являлись актуальными, так как нет возможности гарантировать безоговорочную сохранность

при перевозке грузов, всегда существуют риски возникновения аварийной ситуации, поэтому нет возможности отказаться от конструкции цистерны без средств защи-

ты. Предполагаемая безрамная цистерна должна быть выполнена с применением шпангоутов, а также оснащаться устройствами от саморасцепа, торцевыми щитами для защиты днища котла от пробоя, дугами безопасности для защиты сливно-наливных арматур. Важным вопросом при

дальнейшем исследовании будет применение дополнительных усилений конструкции для предотвращения пробоя котла самими средствами защиты, для этого необходимо создать модели и определить её оптимальные параметры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Авторское свидетельство № 486932 СССР, МПК B61F 5/14, B61D 3/00. Опорное устройство кузова восьмиосного вагона : № 1950889 : заявл. 28.07.1973 : опубл. 05.10.1975 / А. Ф. Довженко, И. Н. Сухов, В. М. Манов [и др.]. – EDN FUGEJE.
2. Авторское свидетельство № 1076342 А1 СССР, МПК B61F 5/02. Опорное устройство кузова восьмиосного вагона на тележку : № 3577751 : заявл. 12.04.1983 : опубл. 28.02.1984 / В. М. Бубнов, М. Ф. Вериге, В. Н. Котуранов [и др.] ; заявитель Московский ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени институт инженеров железнодорожного транспорта, производственное объединение «ЖДАНОВТЯЖМАШ». – EDN QFRPCTC.
3. Нормы для расчёта и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / И. И. Разгонов, В. И. Калашников, В. Г. Иноземцев, С. В. Вершинский / ВНИИВ – ВНИИЖТ 1983 г. 259 с.
4. Патент № 2038240 C1 Российская Федерация, МПК B61D 5/00. железнодорожная цистерна : № 93041371/13 : заявл. 17.08.1993 : опубл. 27.06.1995 / В. Н. Филиппов, Ю. А. Шмыров, Р.

- Ф. Канивец [и др.] ; заявитель Московский государственный университет путей сообщения. – EDN NLYWYC.GATX tank car manual 4th ed.
5. Патент № 2038241 C1 Российская Федерация, МПК B61D 5/00. железнодорожная цистерна : № 93041378/13 : заявл. 17.08.1993 : опубл. 27.06.1995 / В. Н. Филиппов, Ю. А. Шмыров, Р. Ф. Канивец [и др.] ; заявитель Московский государственный университет путей сообщения. – EDN UBNQJK.
6. Технология вагоностроения и ремонта вагонов. Под ред. В. И. Безценного. Учебник для вузов ж.-д. транспорта. М., «Транспорт», 1976. 432 с. Авт.: В. И. Безценный, В. С. Герасимов, Б. М. Кернич, И. Ф. Скиба, Л. В. Терешкин
7. Филиппов В. Н. Расчёт на прочность котлов цистерн для перевозки сжиженных газов / В. Н. Филиппов, В. П. Мальцев, А. В. Смольянинов. // Газовая промышленность. – 1990. – № 5. – С. 50-56.
8. GATX tank car manual – 4-th edition. – General American Transportation corporation, 1979. - 179 p.
9. C. L. Combes. Car and locomotive cyclopedia of American practice / Association of American Railroads. Mechanical Division. 1970. -1074 p.

REFERENCES

1. Dovzhenko AF, Sukhov IN, Manov VM. Inventor's Certificate No. 486932 of the USSR, МПК B61F 5/14, B61D 3/00. Support device of the eight-axle car body. 1975 May 10.
2. Bubnov VM, Verigo MF, Koturanov VN. Inventor's Certificate No. 1076342 МПК B61F 5/02. Support device for the eight-axle car body. 1984 Febr 28.
3. Razgonov II, Kalashnikov VI, Inozemtsev VG, Vershinsky SV. Standards for the calculation and design of new and modernizable railcars of 1520 mm gauge (non-self-propelled). VNIIV – VNIIZHT; 1983.
4. Filippov VN, Shmyrov YuA, Kanivets RF. RF Patent No. 2038240 C1, МПК B61D 5/00. Railway tank. 1995 June 27.

5. Filippov VN, Shmyrov YuA, Kanivets RF. RF Patent No. 2038241 C1, МПК B61D 5/00. Railway tank. 1995 June 27.
6. Beztsenny VI, Gerasimov VS, Kernich BM, Skiba IF, Tereshkin LV. Technology of car building and repair: textbook for universities of railway transport. Moscow: Transport; 1976.
7. Filippov VN, Maltsev VP, Smolyaninov AV. Strength design of tank boilers for transportation of liquefied gases. Gas Industry. 1990;5:50-56.
8. GATX tank car manual, 4-th ed. General American Transportation corporation; 1979.
9. Combes CL. Car and locomotive cyclopedia of American practice. Association of American Railroads. Mechanical Division; 1970.

Информация об авторах:

Плотников Игорь Валентинович – кандидат технических наук, доцент, доцент каф. «Вагоны и ва-

гонное хозяйство» РУТ(МИИТ), Author-ID-РИН 1266240, тел 8-915-457-42-62.

Петров Геннадий Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий каф. «Вагоны и вагонное хозяйство» РУТ(МИИТ), Author-ID-РИНЦ 703184, тел. 8-985-767-46-27.

Plotnikov Igor Valentino vich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Cars and Car Facilities at Russian University of Transport (MIIT), Author-ID-RIN 1266240, phone: 8-915-457-42-62.

Petrov Gennady Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Cars

Карачевский Павел Андреевич – ассистент, аспирант каф. «Вагоны и вагонное хозяйство» РУТ(МИИТ), Author-ID-РИНЦ 1250212, тел 8-950-922-38-44.

and Car Facilities at Russian University of Transport (MIIT), Author-ID-RSCI 703184, phone: 8-985-767-46-27.

Karachevsky Pavel Andreevich – Assistant, Postgraduate Student of the Department of Cars and Car Facilities at Russian University of Transport (MIIT), Author-ID-RSCI 1250212, phone: 8-950-922-38-44.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 07.04.2025; одобрена после рецензирования 30.05.2025; принята к публикации 26.06.2025. Рецензент – Болдырев А.П. доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета.

The article was submitted to the editorial office on 07.04.2025; approved after review on 30.05.2025; accepted for publication on 26.06.2025. The reviewer is Boldyrev A. P., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at Bryansk State Technical University.

Инженерная мысль в России: личности, идеи, разработки
Russian engineering:
personalities, ideas, developments

Редакционная статья

Статья в открытом доступе

УДК 001.3; 308; 378; 929

doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-81-88

БОРИС ГРИГОРЬЕВИЧ КЕГЛИН
(к 90-летию со дня рождения)



Владимир Иванович Попков

Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия
vipo39@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3159-0448>

Аннотация

В статье изложены биографические данные и сведения о творческом пути видного ученого и основателя научной школы в области динамики и прочности транспортных машин, Заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации, Почетного работника ОАО РЖД, доктора технических наук, профессора Бориса Григорьевича Кеглина. Отражены основные этапы производственной деятельности Б.Г. Кеглина на Брянском заводе дорожных машин и полувековой научно-педагогической деятельности в Брянском институте транспортного машиностроения – Брянском госу-

дарственном техническом университете, в котором он более 20 лет руководил кафедрой «Динамика и прочность машин».

Ключевые слова: аспирантура, автосцепка, амортизаторы удара, Брянский институт транспортного машиностроения, Брянский государственный технический университет, динамика и прочность машин, инженер, изобретатель, кафедра, надежность машин, поглощающие аппараты, полимеры, профессор, трение, фрикционные устройства, целевая интенсивная подготовка специалистов.

Ссылка для цитирования:

Попков В.И. Борис Григорьевич Кеглин (к 90-летию со дня рождения) // В.И. Попков // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 7. – С. 81-88. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-81-88.

Original article

Open Access Article

BORIS GRIGOR YEVICH KEGLIN (to the 90th anniversary of his birth)

Vladimir Ivanovich Popkov

Bryansk State Technical University

vipo39@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3159-0448>

Abstract

The paper gives biographical data and information on the creative career of Boris Grigoryevich Keglín, a prominent scientist and founder of the scientific school in the field of dynamics and strength of transport vehicles, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Honorary Employee of Russian Railways, Doctor of Technical Sciences, Professor. The main stages of his production activity are described. B.G. Keglín worked at Bryansk Road Machinery Plant and spent half a century of scientific and pedagogical activity at Bryansk Institute of

Transport Engineering – Bryansk State Technical University, where he headed the Department of Dynamics and Strength of Machines for more than 20 years.

Keywords: postgraduate study, auto coupling, shock absorbers, Bryansk Institute of Transport Engineering, Bryansk State Technical University, dynamics and strength of machines, engineer, inventor, department, machine reliability, absorbing devices, polymers, professor, friction, friction devices, targeted intensive training of specialists.

Reference for citing:

Popkov V.I. Boris Grigoryevich Keglín (to the 90th anniversary of his birth). *Transport Engineering*. 2025;7:81-88. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-81-88.

Борис Григорьевич Кеглин родился 7 июля 1935 года в г. Харькове, где родители работали преподавателями. После войны в 1947 году семья переехала в г. Днепропетровск, в котором Кеглин Б.Г. учился в мужской средней школе № 33. В школе Б.Г.Кеглин увлекся математикой, неоднократно побеждал в областных математических олимпиадах, проводимых Днепропетровским университетом. Был корреспондентом журнала «Математика в школе».

После окончания школы в 1952 году поступил Днепропетровский инженерно-строительный институт на специальность «Строительные машины и оборудование». Во время учебы в вузе продолжал заниматься математикой в секции студенческого научного общества. На старших курсах занимался некоторыми проблемами выносливости деталей машин. В 1957 г. окончил вуз, получив диплом инженера-механика с отличием. К этому времени Б.Г. Кеглин был женат на сокурснице Со-

фье Яковлевне и имел полугодовалого сына. Молодой специалист направляется на работу в город Брянск на завод дорожных машин.

Трудовую деятельность Б.Г. Кеглин начал мастером механосборочного участка автогрейдерного цеха Брянского завода дорожных машин (1957–1960 гг.). С 1958 года одновременно работал преподавателем Брянского вечернего машиностроительного техникума, где проводил занятия по дисциплинам «Машиноведение» и «Автоматизация и механизация в машиностроении». На заводе активно занимался рационализацией; так, благодаря предложенному им решению, вес автогрейдера уменьшился на 40 кг.

В 1960 году поступил в очную аспирантуру Брянского института транспортного машиностроения на кафедру «Детали машин» к доктору технических наук, профессору Льву Николаевичу Никольскому, выдающемуся ученому в области транспортного машиностроения. Момент зна-

комства с Львом Николаевичем Никольским, большим ученым и человеком высокой культуры, Борис Григорьевич считал этапным событием своей жизни, за которым последовало около 20 лет совместной научной и педагогической работы. В аспирантуре Б.Г. Кеглин, наряду с научными, решал и производственные задачи, принимал участие в разработке и исследовании новых высокоэффективных опытных образцов амортизирующих устройств железнодорожного подвижного состава; предложил внедрить сначала пластмассовые и в дальнейшем металлокерамические материалы, которые нашли широкое применение в производстве. Б.Г. Кеглин впервые предложил метод фиксирования температуры на поверхности контакта трения, а также температурных градиентов, в дальнейшем эти работы вошли в учебники по трению.

После окончания аспирантуры с 1963 г. по 1965 г. Б.Г. Кеглин работал ассистентом кафедры «Детали машин и подъемно-транспортные машины». После успешной защиты кандидатской диссертации на тему «Исследование методов повышения стабильности работы фрикционных поглощающих аппаратов автосцепки» (диплом кандидата наук МТН № 015851 от 5.05.1965) Б.Г. Кеглин в 1965 года избирается старшим преподавателем, а в 1967 году – доцентом той же кафедры (аттестат доцента МДЦ № 957913 от 11.11.1970).

В 1970 году в Брянском институте транспортного машиностроения на кафедре «Детали машин» под руководством проф. Л.Н. Никольского была начата подготовка инженеров-исследователей по специальности «Динамика и прочность машин», владеющих навыками проведения расчетных и экспериментальных исследований в области прочности, устойчивости, динамики и надежности машиностроительных конструкций. Специальность сочетала в себе черты классического университетского «мехматовского» и инженерного образования. Формирование инженера-исследователя базируется на высоком уровне подготовки в области математики и фундаментальных дисциплин, знании современных компьютерных технологий, индивидуальной форме обучения и обяза-

тельном привлечении всех студентов к научно-исследовательской работе. Одним из организаторов этой сложной работы был доцент Б.Г. Кеглин, которому были поручены такие дисциплины, как «Аналитическая динамика», «Теория механических колебаний», «Динамика машин» и др. Им были подготовлены лекционные курсы, организованы лаборатории динамики, трения и износа и вычислительные комплексы для решения самых различных и сложных задач.

Педагогическая работа совмещалась с научно-исследовательской деятельностью в области проблем динамики вагона и поезда, процессов трения во всевозможных фрикционных устройствах. В 1981 году Б.Г. Кеглин выпустил монографию «Параметрическая надежность фрикционных устройств» в издательстве «Машиностроение», которая получила высокую оценку научной трибологической общественности. Все это сопровождалось изобретательской деятельностью в области новых конструкций фрикционных устройств и новых трибологических и, прежде всего, порошковых материалов.

По рекомендации проф. Л.Н. Никольского доцент Б.Г. Кеглин переходит на двухгодичную работу в должности старшего научного сотрудника для завершения докторской диссертации. В 1982 году Б.Г. Кеглин успешно защитил в Ленинградском институте железнодорожного транспорта докторскую диссертацию на тему «Оптимизация межвагонных амортизирующих устройств» (диплом доктора наук ТН № 003465), в 1984 году ему присвоено ученое звание профессора по кафедре «Динамика и прочность машин» (аттестат профессора ПР № 011627 от 28.09.1984).

С 1983 года в связи с уходом из жизни проф. Л.Н. Никольского Борис Григорьевич избирается заведующим кафедрой «Динамика и прочность машин» и работает в этой должности до 2005 года, после чего продолжает работать на кафедре в должности профессора.

Под руководством проф. Б.Г. Кеглина кафедра продолжала развивать в учебной и научной деятельности традиции, за-

ложенные Л.Н. Никольским. Расширялся лабораторный корпус для учебных и научных разработок в области динамики, прочности, усталости. Большое внимание уделялось развитию вычислительного оборудования; была создана специальная вычислительная лаборатория, которая вначале была при кафедре, а затем стала вычислительным центром института под шефством кафедры.

Много внимания уделялось связи кафедры и студентов с производством, прежде всего с Брянским машиностроительным заводом. Б.Г. Кеглин был одним из организаторов реализации в вузе на базе кафедры с 1987 г. целевой интенсивной подготовки студентов, по которой готовились кадры для различных структур завода по направлениям «Математическое и программное обеспечение инженерных расчетов», «Вагоностроение», «Подъемно-транспортные машины» и др. Программа ЦИПС предусматривала создание гибкой системы подготовки специалистов, способных оперативно разрабатывать и осваивать в производстве новые высокоэффективные технологические процессы и изделия, обеспечивать переход предприятий на

интенсивный путь развития. Подготовка инженеров велась целенаправленно в интересах конкретных базовых предприятий на кооперативных началах с этими предприятиями. В рамках традиционных по количеству учебных часов студентам был дан значительно больший объем знаний на качественно более высоком уровне. ЦИПС была ориентирована на индивидуальную, поштучную подготовку элитных специалистов с более высокими потенциальными возможностями, заблаговременно ориентированными на решение перспективных задач конкретных предприятий. Система ЦИПС была поддержана Минвузом РСФСР и предприятием. В 1991 г. состоялся первый выпуск инженеров-исследователей по системе ЦИПС. Студенты специальности ДПМ активно привлекались к научно-исследовательской работе кафедры, регулярно участвовали в институтских, республиканских и всесоюзных студенческих конференциях и конкурсах. За успешное руководство студенческими научными работами проф. Кеглин Б.Г. был награжден дипломом МВ и ССО СССР и ЦК ВЛКСМ.



Профессор Б.Г.Кеглин с учениками

Глубокие знания и интерес к науке в сочетании с организаторскими способностями всегда привлекали к нему молодежь. При кафедре под руководством проф. Б.Г. Кеглина успешно функционировала аспирантура. В период 1984–2009 гг. Б.Г. Кеглин, являясь научным руководителем, подготовил 22 кандидата технических наук.

Важной стороной деятельности проф. Б.Г. Кеглина было создание научно-технической, исследовательской и конструкторской школы, которая стала известна предприятиям и научно-техническим организациям, связанным с железнодорожным транспортом. Кафедра «Динамика и прочность машин» постоянно выполняла задания по планам новой техники Министерства путей сообщения, вела хозяйственные работы по заказам вагоностроительных заводов, направленные на снижение действующих на подвижной состав нагрузок за счет совершенствования амортизирующих устройств, исследования процессов трения и износа и др. В 1986 г. межведомственная комиссия Минтяжмаша СССР разрешила установку металло-керамических поглощающих аппаратов ПМК-110А, разработанных кафедрой, на рефрижераторных вагонах производства БМЗ, а в следующем году – на всех грузовых вагонах. В 1988 г. Б.Г. Кеглин был награжден за разработку и внедрение поглощающего аппарата ПМК-110 серебряной медалью ВДНХ и дипломом Всесоюзного конкурса за лучшие работы по повышению надежности машиностроительной продукции.

Государственным признанием научных достижений кафедры явилось создание Министерством тяжелого и транспортного машиностроения СССР и Минвузом РСФСР в 1988 году отраслевой научно-исследовательской лаборатории по динамике, прочности и надежности транспортных машин при кафедре «Динамика и прочность машин» БИТМ, руководителем был назначен проф. Б.Г. Кеглин. Открытие отраслевой лаборатории позволило расширить научно-исследовательские работы по созданию

новой техники для транспортных машин. В этой лаборатории был выполнен большой комплекс научно-исследовательских работ по разработке новых конструкций амортизирующих устройств вагонов повышенной энергоемкости по заказам Брянского машиностроительного завода и «Абаканвагонмаша».

В 1998 г. для реализации научных разработок кафедры Б.Г. Кеглин учредил ООО «Научно-производственное предприятие «Дипром». В трудные 90-е годы кафедра совместно с ООО «НПП «Дипром» продолжали работы по совершенствованию амортизирующих устройств подвижного состава. Были разработаны и запатентованы конструкции фрикционно-полимерных, фрикционно-гидравлических и гидрополимерных поглощающих аппаратов, изготовлены и испытаны их опытные образцы. Под руководством Б.Г. Кеглина на НПП «ДИПРОМ» при участии инженеров Бежицкого сталелитейного завода на базе аппарата ПМК-110 был создан поглощающий аппарат ПМКП-110, в котором используются полимерные упругие блоки, что позволило значительно повысить энергоемкость аппарата и его надежность. Аппарат ПМКП-110 – первый в мировой практике фрикционный поглощающий аппарат, не требующий предварительной приработки для получения нормативной энергоемкости. В начале 2000-х годов аппарат ПМКП-110 выпускался на десяти предприятиях России, Украины и Казахстана, общий объем выпуска к концу 2013 г. превысил 440000 штук. При совершенствовании аппарата ПМКП-110 был разработан новый металлокерамический материал К-30, обеспечивающий повышенную износостойкость. Кафедрой «Динамика и прочность машин» и ООО «НПП «Дипром» разработаны поглощающие аппараты новых типов – эластомерные ЭПА-120 и фрикционно-эластомерные МКЭ – повышенной энергоемкости, предназначенные для цистерн и вагонов, перевозящих дорогие и опасные грузы.

Проф. Б.Г. Кеглин является автором около 300 научных работ, в том числе 4 монографий, 28 изобретений, восемь из

которых были внедрены, 50 отчетов о выполненных НИР по заказам предприятий, министерств и ведомств. Статьи Б.Г. Келина опубликованы в ведущих научно-технических журналах: «Вестник машиностроения», «Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта», «Вестник Брянского государственного технического университета», «Железнодорожный транспорт», «Заводская лаборатория», «Известия вузов. Машиностроение», «Справочник. Инженерный журнал», «Трение и износ», «Тяжелое машиностроение» и др. Монографии Б.Г. Кеглина посвящены расчету и проектированию амортизаторов удара подвижного состава, широко используются инженерами-вагоностроителями. Под редакцией Б.Г. Кеглина регулярно издавались сборники научных трудов «Динамика, прочность и надежность транспортных машин». Являлся членом редколлегии журнала «Вестник Брянского государственного технического университета». Профессор Б.Г. Кеглин хорошо известен в российском и мировом научном сообществе, являлся членом оргкомитетов многих российских и международных научных конференций.

Б. Г. Кеглин принимал активное участие в общественной жизни. В разные годы он являлся заместителем председателя совета по новой технике и председателем комиссии по внедрению ЭВМ в учебный процесс и НИР при Совете ректоров вузов г. Брянска, членом координационного Совета по динамике и прочности машин и Совета по триботехнике, в течение многих лет был членом специализированных советов по защитах диссертаций: по подвижному составу, динамике и прочности машин, триботехнике, технологии машиностроения и т. п. Б.Г. Кеглин являлся председателем секции городского совета НТО Машпром, председателем секции надежности и качества Совета по техническим наукам Брянского научного центра.

Неотъемлемой частью жизни Бориса Григорьевича был спорт. Он прекрасно играл в теннис, шахматист-

перворазрядник. Регулярно участвовал в межвузовских соревнованиях, защищая честь вуза и занимая призовые места. Любил отдых на природе. Любимое место отдыха – студенческий лагерь «Сосновка», в котором он отдыхал более 40 раз. Считал, что в студенческой среде особая энергетика.

Борис Григорьевич Кеглин был достойным продолжателем лучших традиций российской инженерной школы, его отличали высокая культура общения, интеллигентность, уважительное отношение к коллегам и студентам. Он пользовался заслуженным авторитетом у студентов, сотрудников вуза, в научных и инженерных кругах не только в России, но и за рубежом. Более шестидесяти лет рядом с ним была преданный друг – жена Софья Яковлевна (1933 – 2018), которая сумела создать в доме необходимую для творчества атмосферу.

За многолетнюю научно-педагогическую деятельность Борис Григорьевич Кеглин неоднократно награждался почетными грамотами Минвуза РСФСР, дважды – дипломами Минвуза СССР, почетной грамотой Совета Министров СССР и ВЦСПС, грамотами и благодарностями администрации Брянской области, города Брянска, заносился на доску почета университета. В 2005 г. ему присвоено звание «Почетный работник высшего профессионального образования», в 2010 г. – «Почетный железнодорожник ОАО РЖД».

В 1995 г. Указом Президента Российской Федерации за заслуги в научной деятельности Б.Г. Кеглину присвоено звание «Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации» (Указ Президента Российской Федерации от 10.04.1995 г. № 351). В 2000 году он был награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» 2-й степени (Указ Президента Российской Федерации от 29.05.2001 г. № 606).

Борис Григорьевич Кеглин скончался 2 октября 2019 г. в административном округе Берлина Шарлоттенбург – Вильмерсдорф.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Личное дело проф. Б.Г.Кеглина / Отдел кадрового обеспечения ПФУ БГТУ.
2. Трифанков, Ю.Т. Вуз и общество: на пути технического прогресса: монография / Ю.Т.Трифанков, Е.Н.Рафиенко. Под ред. В.И.Попкова. Брянск: БГТУ, 2005. 258 с. – ISBN 5-89838-155-4.
3. Ректоры, проректоры, деканы, заведующие кафедрами, профессора Брянского государственного технического университета (1929 – 2004 гг.): справочник / под ред. С.П.Сазонова; сост. С.П.Сазонов, В.Т.Буглаев, М.В.Мельникова; вступ. ст. С.П.Сазонова. Брянск: БГТУ, 2004. 52 с. – ISBN 5-89838-128-7.
4. Биобиблиографический указатель трудов проф. Б.Г.Кеглина: к 80-летию со дня рождения / сост. Н.В.Кравцова. Брянск: БГТУ, 2015. 50 с. – (Серия «Ученые БГТУ»).
5. Кеглин, Б. Г. О расчете релаксационных колебаний, возникающих при ударе во фрикционный амортизатор / Б. Г. Кеглин // Известия вузов. Серия «Машиностроение». 1962. № 4. С. 117–126.
6. Кеглин, Б. Г. О расчетной схеме грузового вагона в некоторых задачах продольной динамики / Б. Г. Кеглин // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 1969. № 3. С. 16–20.
7. Кеглин, Б. Г. Синтез оптимального амортизатора удара вагонов / Б. Г. Кеглин // Известия вузов. Машиностроение. 1981. № 3. С. 6–9.
8. Кеглин, Б.Г. Параметрическая надежность фрикционных устройств: монография / Б.Г.Кеглин. М.: Машиностроение, 1981. 135 с.
9. Кеглин, Б. Г. К выбору параметров амортизирующего устройства пассажирского вагона / Б. Г. Кеглин // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 1984. № 1. С. 37–40.
10. Никольский, Л.Н. Амортизаторы удара подвижного состава: монография / Л.Н.Никольский, Б.Г.Кеглин. М.: Машиностроение, 1986. 144 с.
11. Кеглин, Б. Г. Особенности измерения температуры при нестационарных процессах трения / Б. Г. Кеглин, В. П. Тихомиров // Трение и износ. 1990. Т. 11, № 1. С. 73–76.
12. Качество машин: справочник: в 2 т. Т. 1 / А.Г. Суслов [и др.]; под общ. ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 1995. 256 с.
13. Болдырев, А.П. Расчет и проектирование амортизаторов удара подвижного состава: монография / А.П.Болдырев, Б.Г.Кеглин. М.: Машиностроение, 2004. 199 с.
14. Кеглин, Б.Г. Создание новых амортизаторов удара вагонов (опыт внедрения новой техники на железнодорожном транспорте России) / Б.Г.Кеглин // Вестник Брянского государственного технического университета. 2014. № 4 (44). С. 41–45.
15. Немешаева, Т. «...и законы постижения личности» / Т.Немешаева // Брянский рабочий. 8 июля 2005 г.

REFERENCES

1. Personal file of professor Keglina BG./ HR Department of BSTU PFU.
2. Trifankov YuT, Rafienko EN. University and society: on the path of technical progress: monograph. Bryansk: BSTU Publishing House; 2005.
3. Sazonov SP, Buglaev VT, Melnikova MV. Rectors, vice-rectors, deans, heads of departments, professors of Bryansk State Technical University (1929 - 2004): handbook. Bryansk: BSTU; 2004.
4. Kravtsova NV. Bio-bibliographic index of Professor Keglina works: to the 80th anniversary of his birth. Bryansk: BSTU; 2015.
5. Keglina BG. On the calculation of relaxation vibrations occurring upon impact in a friction shock absorber. BMSTU Journal of Mechanical Engineering. 1962;4:117-126.
6. Keglina BG. On the design of a freight car in some problems of longitudinal dynamics. Russian Railway Science Journal. 1969;3:16-20.
7. Keglina BG. Synthesis of an optimal shock absorber for cars. BMSTU Journal of Mechanical Engineering. 1981;3:6-9.
8. Keglina BG. Parametric reliability of friction devices: monograph. Moscow: Mashinostroenie; 1981.
9. Keglina BG. On the choice of parameters of a passenger car shock-absorbing device. Russian Railway Science Journal. 1984;1:37-40.
10. Nikolsky LN, Keglina BG. Rolling stock shock absorbers: monograph. Moscow: Mashinostroenie; 1986.
11. Keglina BG, Tikhomirov VP. Features of temperature measurement in nonstationary friction processes. Friction and Wear. 1990;11(1):73-76.
12. Suslov AG. Quality of machines: handbook. Moscow: Mashinostroenie; 1995.
13. Boldyrev AP, Keglina BG. Calculation and design of shock absorbers for rolling stock: monograph. Moscow: Mashinostroenie; 2004.
14. Keglina BG. Development of new shock absorbers for cars (experience of introducing new technology in Russian railway transport). Bulletin of Bryansk State Technical University. 2014;4(44):41-45.
15. Nemshaeva T. "... and the laws of understanding a personality". Bryansky Rabochy. 2005 July 8.

Информация об авторе:

Попков Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент, Почетный гражданин города Брянска, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, почетный работник газовой промышленности, член-корр. Российской академии естественных наук, член Ассоциации инже-

нерного образования России, член редколлегии журнала «Актуальная наука»; тел. 8-903-869-33-30, между-народные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 56363705400, Researcher-ID-Web of Science G-3869-2016, Author-ID-РИНЦ 615365.

Popkov Vladimir Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Honorary Citizen of Bryansk, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Honorary Worker of the Gas Industry, Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, member of the Association of

Engineering Education of Russia, member of the Editorial Board of the journal Actual Science; phone: 8-903-869-33-30, Scopus-Author ID 56363705400, Researcher-ID-Web of Science G-3869-2016, Author-ID-RSCI 615365.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Редакционная статья

Статья в открытом доступе

УДК 001.3; 308; 378; 929

doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-89-97

ПЕТР ИВАНОВИЧ ЯЩЕРИЦЫН (к 110-летию со дня рождения)



Анатолий Григорьевич Суслов¹, Владимир Иванович Попков^{2✉}

^{1,2} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ naukatm@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2566-2759>

² vipo39@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3159-0448>

Аннотация

Описана производственная, педагогическая, научная и организаторская деятельность видного советского и белорусского ученого в области технологии машиностроения, выпускника Орджоникидзградского машиностроительного института (ныне Брянский государственный технический университет) 1941 г., академика АН БССР, академика НАН Беларуси, заслуженного деятеля науки и техники БССР, почетного профессора БГТУ, доктора технических наук, профессора Петра Ивановича Ящерицына. Рассмотрен его вклад в развитие технологии машиностроения, создание основ теории влияния

технологической наследственности на эксплуатационные свойства деталей машин, в разработку вопросов совершенствования финишных операций механической обработки деталей, скоростного шлифования деталей, повышения долговечности и работоспособности шлифованных деталей, технологии производства подшипников качения, надежности транспортных устройств автоматических линий.

Ключевые слова: трудовая деятельность, институт, университет, производство, машиностроение.

Ссылка для цитирования:

Суслов А.Г. Петр Иванович Ящерицын (к 110-летию со дня рождения) / А.Г. Суслов, В.И. Попков // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 7. – С. 89-97. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-89-97.

Original article

Open Access Article

PETR IVANOVICH YASHCHERITSYN

(to the 110th anniversary of his birth)

Anatoly Grigoryevich Suslov¹, Vladimir Ivanovich Popkov²✉

^{1,2} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ naukatm@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2566-2759>

² vipo39@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3159-0448>

Abstract

The paper describes the production, pedagogical, scientific and organizational activities of Petr Ivanovich Yashcheritsyn, the prominent Soviet and Belarusian scientist in the field of mechanical engineering technology, a graduate of Ordzhonikidzeград Machine-Building Institute (now Bryansk State Technical University) in 1941, academician of the Academy of Sciences of the BSSR, academician of the National Academy of Sciences of Belarus, honored worker of Science and Technology of the BSSR, honorary professor of BSTU, Doctor of Technical Sciences. The paper also considers his contribution to the development of the

technology of mechanical engineering, the creation of theory foundations of the influence of technological heredity on the operational properties of machine parts, to the development of issues related to improving the finishing operations of machining parts, high-speed grinding of parts, increasing the durability and operability of ground parts, rolling bearing production technology, reliability of trans-tailors of automatic line devices.

Keywords: labor activity, institute, university, production, mechanical engineering.

Reference for citing:

Suslov AG, Popkov VI. Petr Ivanovich Yashcheritsyn (to the 110th anniversary of his birth). *Transport Engineering*. 2025;7: 89-97. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-89-97.

30 июня 2025 г. исполняется 110 лет со дня рождения видного советского и белорусского ученого в области технологии машиностроения, выпускника Орджоникидзегградского машиностроительного института (ныне Брянский государственный технический университет) 1941 г., академика АН БССР, академика НАН Беларуси, заслуженного деятеля науки и техники БССР, почетного профессора БГТУ, доктора технических наук, профессора Петра Ивановича Ящерицына.

Пётр Иванович Ящерицын родился 30 июня 1915 г. в г. Людиново Калужской области в рабочей семье тружеников Людиновского локомобильного завода. После окончания 6 классов школы и фабрично-заводского училища в 15 лет начал трудовую деятельность слесарем-электромонтером Людиновского локомобильного завода (в настоящее время Людиновский тепловозостроительный завод). Петр Иванович работал и одновременно учился на вечернем отделении машиностроительного техникума при заводе. Высокая успеваемость позволила ему свободно выбрать место работы или дальнейшей учебы. В 1937 г. Петр Иванович поступил в Орджоникидзегградский машинострои-

тельный институт (в настоящее время Брянский государственный технический университет). В вузе Петр Иванович познакомился с Раисой Дмитриевной Хотеевой, старшей дочерью из многодетной семьи. Их знакомство затем превратилось в супружеский союз, продолжавшийся до 2005 г. Учеба, производственная деятельность, испытания Великой Отечественной войны – они всегда рядом, вместе, рука об руку, переживая, разделяя все радости и трудности. Учеба в институте была прервана войной. Заканчивать учебу и защищать диплом пришлось в Нижнем Тагиле, куда институт был эвакуирован. 25 декабря 1941 г. П.И. Ящерицын получил диплом инженера-механика с отличием по специальности «Станки, инструменты и механическая обработка материалов», а 28 декабря уже зачислен старшим мастером РМЦ 6-го Государственного подшипникового завода в г. Свердловске. Здесь он прошел славный трудовой путь (начальник цеха, главный технолог) до главного инженера – заместителя директора (1949). Раиса Дмитриевна все годы войны проработала технологом производства подшипникового завода.

Предложив применение при шлифовании колец подшипников высокопористых абразивных кругов, через поры которых смазочно-охлаждающая жидкость поступает непосредственно в зону резания, П.И. Ящерицыну удалось решить одну из острейших проблем производства того времени – значительного брака по причине прижогов и трещинообразования. Применение высокопористых абразивных кругов позволило не только существенно снизить брак, но и повысить скорость резания при шлифовании и производительность обработки. Метод скоростного шлифования, предложенный П.И. Ящерицыным, начал внедряться на других предприятиях страны.

Полученные в процессе исследований и внедрения скоростного шлифования результаты легли в основу кандидатской диссертации П.И. Ящерицына «Исследование процесса скоростного шлифования», которую он успешно защитил 26 июня 1950 г. в Уральском политехническом институте. Первые научные работы П.И. Ящерицына опубликованы в 1952 г. В них анализируется и обобщается передовой опыт механической обработки, вносятся ряд важных технологических и конструкторских предложений. В его первых работах уже просматривалось стремление проанализировать весь технологический процесс в комплексе, оценить влияние как конкретных операций и переходов, так и их последовательности на эксплуатационные показатели обработанных поверхностей, работоспособность и надежность деталей в узлах и изделиях. П.И. Ящерицын постепенно подходил к глубокому научному пониманию взаимосвязей в технологии и формулировке своего важнейшего научного направления – явления технологической наследственности.

В августе 1952 г. Петр Иванович получает назначение на новое место работы. Приказом министра автомобильной и тракторной промышленности № 553 от 25 августа 1952 г. П.И. Ящерицын назначен директором строящегося ГПЗ № 11 в г. Минске. Здесь в полной мере раскрылись его способности высококвалифицированного специалиста и организатора высоко-

технологического производства, а также крупного ученого в области технологии машиностроения. Петр Иванович интересовался всеми аспектами жизни коллектива ГПЗ и принимал живое участие в его судьбе. Руководя заводом, Петр Иванович продолжал работу над докторской диссертацией. Основа его творческой работы – разработка новых, более прогрессивных технологий в металлообработке. Молодого директора, энергичного организатора Ящерицына приглашает на работу самый крупный вуз города – Белорусский политехнический институт, где расцвёл талант эрудированного педагога, умного наставника. Совмещая работу директора строящегося подшипникового завода с работой в БПИ, он быстро завоевал авторитет крупного учёного в области прогрессивных технологий в металлообработке.

В июне 1962 г. постановлением Совнархоза БССР (протокол №13 от 1 июня 1962 г.) П.И. Ящерицын возглавил крупнейший технический вуз страны – Белорусский политехнический институт, где проявились его выдающиеся способности по подготовке и воспитанию научных кадров, организации учебного процесса. За время работы Петра Ивановича на посту ректора (1962–1976) в институте значительно увеличилось количество студентов, образовались новые кафедры и начала проводиться подготовка специалистов по новым актуальным специальностям. С его непосредственной подачи организованы новые учебные заведения – Полоцкий политехнический и Могилевский машиностроительный институты и др. В 1962 г. П.И. Ящерицын защитил докторскую диссертацию на тему «Исследование механизма образования шлифованных поверхностей и их эксплуатационных свойств», в которой всесторонне рассмотрены физические основы и закономерности формирования шероховатости поверхностей при шлифовании и влияние технологических режимов, вида технологических сред и способов их подачи в рабочую зону, характеристик абразивных кругов и других параметров на эксплуатационные свойства обработанных поверхностей и работу изделий в целом. В диссертации уже сфор-

мулированы целостная система взглядов и основные положения явления технологической наследственности в процессах изготовления и эксплуатации деталей и узлов. Ближайшей помощницей и первым читателем его работ была супруга – Раиса Дмитриевна Хотеева, которая в 1964 г. защитила кандидатскую диссертацию на тему «Исследование состояния рабочих поверхностей шарикоподшипников в различные периоды их износа». С 1963 по 1984 гг. П.И. Ящерицын заведует кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» Белорусского политехнического института, которая за это время стала крупным научным центром. В 1964 г. Петр Иванович утвержден в ученом звании профессора. Важную роль в деле подготовки научных кадров высшей квалификации выполнял созданный в 1976 г. по инициативе П.И. Ящерицына и под его председательством специализированный совет по технологии машиностроения, процессам и машинам обработки материалов резанием. Петром Ивановичем подготовлена целая плеяда ученых и практиков, составляющих сегодня цвет и гордость белорусского машиностроения. Не одно поколение студентов изучало и изучает технологию машиностроения, теорию резания и режущий инструмент по учебникам П.И. Ящерицына: «Теория резания. Физические и тепловые явления в технологических системах», «Основы резания металлов и режущий инструмент», «Основы технологии механической обработки и сборки в машиностроении». Его лекции по теории резания и технологии машиностроения, которые он читал более 40 лет, отличались высоким научным и методическим уровнем, доступностью материала и логической стройностью.

В 1969 г. избран членом-корреспондентом, а в 1974 г. – академиком АН БССР. В 1972 г. Петру Ивановичу присвоено звание «Заслуженный деятель науки и техники БССР».

С апреля 1976 г. П.И. Ящерицын работает в Академии наук БССР (1976–1987 гг. – академик-секретарь Отделения физико-технических наук Академии наук БССР) и одновременно руководит лабораторией

физики поверхностных явлений Физико-технического института АН БССР. Как академик-секретарь Петр Иванович уделял много внимания организации и развитию фундаментальных и прикладных исследований в институтах Отделения физико-технических наук, повышению эффективности исследований, укреплению связей науки с производством, подготовке высококвалифицированных научных кадров. В 1978 г. за комплекс работ по организации производства гидравлического оборудования высокого технического уровня совместно с группой сотрудников АН БССР и Гомельского ПО «Гидровтоматика» П.И. Ящерицыну присуждена Государственная премия БССР в области техники.

Пётр Иванович Ящерицын – крупнейший ученый в области физики процессов обработки материалов, технологии машиностроения. Научная школа абразивно-алмазной обработки материалов, созданная академиком, д.т.н., профессором П.И. Ящерицыным известна и признана во всем мире. Выдающимся научным достижением П.И. Ящерицына является созданная им теория технологической наследственности, которая обогатила науку о резании материалов, стала крупным вкладом в развитие технологии машиностроения. С позиций технологической наследственности выполнены фундаментальные исследования финишных процессов обработки деталей из компактных, порошковых и неметаллических материалов. В настоящее время это направление широко признано в мире и является фундаментальным положением технологии машиностроения и инженерии поверхности. Глубоко вникая в суть физических явлений при исследовании различных методов металлообработки, он сформулировал основные закономерности формирования эксплуатационных свойств шлифованных деталей. С позиции технологической наследственности эти положения раскрыты в его докторской диссертации. Долгая борьба с непониманием сути явления технологической наследственности закончилась с выходом в 1971 г. первой монографии П.И. Ящерицына на эту тему. Понятие и термин «технологическая наследственность» прочно

вошли в учебники по технологии и инженерии поверхности.

Под руководством П.И. Ящерицына созданы процессы силового развёртывания, упрочняющей обработки нежестких деталей, новые методы обработки деталей с использованием энергии магнитных и электрических полей. Изучена обрабатываемость резанием порошковых материалов и покрытий, закаленных спеченных сталей. Исследовано формирование напряженного состояния материала и инструмента в зоне резания, особенности стружкообразования в условиях устойчивого резания и вибраций, термоупругое состояние режущих пластин сборного инструмента, предложено диагностирование износа режущих инструментов методом акустической спектрометрии.

Петр Иванович возглавил школу белорусских ученых, развивающих важные направления по созданию научных основ, изучению физических и физико-химических явлений при резании, установлению закономерностей формирования и управления эксплуатационными свойствами функциональных поверхностей при обработке. В рамках его школы в настоящее время проводятся комплексные теоретические и экспериментальные исследования новых высокоэффективных процессов финишной обработки труднообрабатываемых и композиционных материалов, создаются новые технологии, инструменты и оборудование для их реализации. В лаборатории физики поверхностных явлений создано новое в Республике Беларусь научное направление по оценке эксплуатационных характеристик, разработке методик и созданию оборудования для испытания и сертификации режущих инструментов.

Научная школа технологов-машиностроителей Беларуси, одним из создателей которой является академик П.И. Ящерицын, отличается сочетанием глубоких фундаментальных исследований процессов механической и физико-технической обработки материалов и практической направленностью разработок. П.И. Ящерицыным и его учениками выполнен ряд работ прикладного характе-

ра, направленных на повышение качества подшипников качения, гидравлической аппаратуры, оптических деталей, режущих инструментов, автоматизированного станочного оборудования.

Возглавив лабораторию физики поверхностных явлений Физико-технического института, Петр Иванович придал мощный импульс развитию новых методов механической обработки материалов с позиций технологической наследственности, обновил и актуализировал тематику исследований, чем внес огромный вклад в становление и развитие технологической школы в Республике Беларусь. Под его руководством в Физико-техническом институте НАН Беларуси получили дальнейшее развитие научные исследования по ротационному резанию, поверхностно-пластическому деформированию, магнитно-абразивной обработке, начали проводиться исследования в области физико-химических проблем резания материалов. Разработаны методы оптимизации технологических режимов, обеспечивающие многократное увеличение производительности процессов обработки, значительное повышение качества и улучшение эксплуатационных свойств обработанных деталей. Высокую оценку специалистов заслуживают труды П.И. Ящерицына, посвященные разработке и исследованию технологических процессов и оборудования для скоростного шлифования металлов. Важное научное и практическое значение имеют работы П.И. Ящерицына в областях механики и динамики процессов лезвийной и абразивной обработки материалов резанием, физических основ резания металлов, проблем обрабатываемости резанием и физических закономерностей процессов резания спеченных и порошковых материалов, а также основ проектирования режущего инструмента, установления закономерностей и механизмов его изнашивания. Под его руководством в ФТИ, БПИ и других научных институтах Беларуси выполнены исследования обработки комбинированными инструментами, электрохимической заточки твердосплавного инструмента, шлифования инструментом с ориентированными алмазными зернами,

полирования изделий уплотненным потоком свободного абразива, новых видов инструментов для упрочняющей обработки, надежности и производительности автоматических линий. Труды Петра Ивановича вносят большой вклад в научные основы технологии машиностроения, инженерии

поверхности. Они получили широкую известность в нашей стране и за рубежом. Особенно известны и популярны они были в Словакии, где активно внедрялись в производство и где сам Пётр Иванович часто бывал на различных форумах, симпозиумах учёных.



Делегация БГТУ поздравляет академика П.И.Ящерицына с 90-летием со дня рождения. Минск. 2 июля 2005 года.
Слева направо: В.И. Попков, А.В. Лагереv, П.И. Ящерицын, В.И. Аверченков

По результатам научных исследований П.И. Ящерицыным опубликовано свыше 600 печатных работ, в том числе 40 монографий, более 15 брошюр. Его изобретения защищены более 160 авторскими свидетельствами и 17 зарубежными патентами. На учебниках Петра Ивановича подготовлены несколько поколений инженеров-механиков. П.И. Ящерицын большое внимание уделял подготовке высококвалифицированных кадров и специалистов для научных учреждений и предприятий страны. Им подготовлено 16 докторов и 87 кандидатов наук, среди которых видные ученые, руководители вузов и предприятий. Петру Ивановичу Ящерицыну присуждена ученая степень почетного доктора Словацкой высшей технической школы в г. Братиславе и Белорусского национального технического университета, он избран по-

четным профессором Брянского госуниверситета. В 2005 г. П.И. Ящерицыну присуждена премия НАН Беларуси за цикл монографий 1999–2005 гг. «Формирование научных основ и создание технологических комплексов для машиностроительного производства».

Крупный ученый и организатор науки академик П.И. Ящерицын принимал активное участие в общественной жизни республики. В 1963–1967 и в 1971–1975 годах избирался депутатом Верховного Совета БССР. В 1978–1985 гг. – главный редактор республиканского межведомственного сборника «Машиностроение». С 1987 г. – советник Президиума АН БССР.

За большие трудовые заслуги и выдающийся вклад в развитие науки Петр Иванович Ящерицын награжден орденами Ленина, Октябрьской Революции, Трудо-

вого Красного Знамени, Дружбы народов, орденом Франциска Скорины (2000) – за многолетнюю плодотворную научно-педагогическую деятельность, подготовку научных кадров, многочисленными медалями и другими почётными наградами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ящерицын, Петр Иванович. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki>. – Дата обращения: 17.06.2025.
2. Ящерицын Петр Иванович. – URL: <https://www.tu-bryansk.ru/about/pochetnye-professora-bgtu/yashceritsyn-petr-ivanovich>. – Дата обращения: 17.06.2025.
3. Трифанков, Ю.Т. Вуз и общество: на пути технического прогресса: монография / Ю.Т. Трифанков, Е.Н. Рафиенко. Под ред В.И. Попкова. Брянск: Изд во БГТУ, 2005. 258 с. –
4. Ректоры, проректоры, деканы, заведующие кафедрами, профессора Брянского государственного технического университета (1929 – 2004 гг.): справочник / под ред. С.П. Сазонова; сост. С.П. Сазонов, В.Т. Буглаев, М.В. Мельникова; вступ. ст. С.П. Сазонова. – Брянск: БГТУ, 2004. 52 с. – ISBN 5-89838-128-7.
5. Горленко, О.А. Выпускники БГТУ (БИТМа): библиографический справочник / О.А. Горленко, В.И. Попков. Брянск: БГТУ, 2009. Вып.
6. Новиков, В. Наш земляк – академик Ящерицын / В. Новиков // Людиновский рабочий. – 2024. № 129. 16 августа.
7. Вершина, Г.А. Они возглавляли БГПИ-БПИ-БГПА-БНТУ / Г.А. Вершина, К.И. Баландин // Наука и техника. 2020. Т. 19. № 6. С. 454 – 468.
8. Астапчик, С.А. Ученый – инженер – учитель / С.А. Астапчик, В.Я. Лебедев // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. 2015. № 3. С. 5–9.
9. Ящерицын, П.И. Скоростное шлифование / П.И. Ящерицын. Москва; Свердловск: Машгиз. [Урало-Сиб. Отд-ние], 1953. – 112 с.
10. Ящерицын, П.И. Шлифование металлов / П.И. Ящерицын, Е.А. Жалнерович. Минск: Беларусь, 1963. 356 с.
11. Ящерицын, П.И. Повышение эксплуатационных свойств шлифованных деталей / П.И. Ящерицын. Минск: Наука и техника, 1966. 384 с.
12. Ящерицын, П.И. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства шлифованных деталей / П.И. Ящерицын. – Минск: Наука и техника, 1971. 210 с.
13. Ящерицын, П.И. Повышение качества шлифованных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента / П.И. Яще-

Петр Иванович Ящерицын скончался 5 сентября 2005 г. Похоронен на кладбище «Северное-2» г. Минска. Его имя носит учебная лаборатория в учебном корпусе № 6 Белорусского национального технического университета.

- рицын, А.Г. Зайцев; АН БССР. Минск: Наука и техника, 1972. 478 с.
14. Ящерицын, П.И. Современные методы и средства контроля качества деталей / П.И. Ящерицын, Л.А. Олендер, Э.П. Нехамкин. Минск: Беларусь, 1975. 200 с.
15. Ящерицын, П.И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов / П.И. Ящерицын, А.Г. Зайцев, А.И. Барботько; АН БССР. Минск: Наука и техника, 1976. 325 с.
16. Ящерицын, П.И. технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. Минск: Наука и техника, 1977. 255 с.
17. Ящерицын, П.И. Технологическая и эксплуатационная наследственность и ее влияние на долговечность машин / П.И. Ящерицын. Минск: Наука и техника, 1978. 119 с.
18. Ящерицын, П.И. Финишная обработка деталей уплотненным потоком свободного абразива / П.И. Ящерицын, А.Н. Мартынов, А.Д. Гридин. Минск: Наука и техника, 1978. 224 с.
19. Основы проектирования режущих инструментов с применением ЭВМ: [учеб. пособие для машиностроит. спец. вузов] / П.И. Ящерицын, Б.И. Синицын, Н.И. Жигалко, И.А. Басс. Минск: Вышэйш. школа, 1979. 310 с.
20. Ящерицын, П.И. Основы резания материалов и режущий инструмент: [учебник для инж.-пед., инж.-экон. спец. машиностроит. профиля вузов] / П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко, Н.И. Жигалко. 2-е изд., доп. и перераб. Минск: Вышэйш. школа, 1981. 560 с.
21. Ящерицын, П.И. Электроэрозионная правка алмазно-абразивных инструментов / П.И. Ящерицын, В.Д. Дорофеев, Ю.А. Пахалин. Минск: Наука и техника, 1981. 231 с.
22. Ящерицын, П.И. Ротационное резание материалов / П.И. Ящерицын, А.В. Борисенко, И.Г. Дривотин, В.Я. Лебедев; АН БССР, Физ.-техн. Ин-т. Минск: Наука и техника, 1987. 228 с. – (Наука и технический прогресс).
23. Ящерицын, П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: [учеб. Для вузов по спец. 12.01 «Технология машиностроения» и 12.02 «Металлорежущие станки и инструменты»] / П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко, Е.А. Фельдштейн. Минск: Вышэйш. школа, 1990. 510 с.
24. Ящерицын, П.И. Металлорежущие станки: учеб. для студентов специальности «Механи-

зация сел. хоз-ва» с.-х. вузов / П.И. Ящерицын, В.Д. Ефремов; под ред. А.И. Кочергина; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. аграр. техн. ун-т. Минск, 2001. 446 с.

25. Металлорежущие станки: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки дипломирован-

ных специалистов – «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» / В.Д. Ефремов [и др.]; под общ. ред. П.И. Ящерицына. Изд. 4-е, перераб. и доп. Старый Оскол (Белгородская обл.): Тонкие наукоемкие технологии, 2007. 695 с.

REFERENCES

1. Yashcheritsyn Peter Ivanovich [Internet]. [cited 2025 June 17]. Available from: <https://ru.wikipedia.org/wiki>.
2. Yashcheritsyn Peter Ivanovich [Internet]. [cited 2025 June 17]. Available from: <https://www.tu-bryansk.ru/about/pochetnye-professora-bgtu/yashcheritsyn-petr-ivanovich>.
3. Trifankov YuT, Rafienko EN. University and society: on the path of technical progress: monograph. Bryansk: BSTU Publishing House; 2005.
4. Sazonov SP, Buglaev VT, Melnikova MV. Rectors, vice-rectors, deans, heads of departments, professors of Bryansk State Technical University (1929 - 2004): handbook. Bryansk: BSTU; 2004.
5. Gorlenko OA, Popkov VI. Graduates of BSTU (BITM): bibliographic reference. Bryansk: BSTU; 2009;1:90.
6. Novikov V. Our fellow countryman, Academician Yashcheritsyn. Ludinovskiy Rabochy. 2024;129: August 16.
7. Vershina GA, Balandin KI. They were at the head of BGPI – BPI – BGPA – BNTU. Science and Technique. 2020;19(6):454-468.
8. Astapchik SA, Lebedev VYa. Scientist – engineer – teacher. Vesci National akademii navuk Belarussi. 2015;3:5-9.
9. Yashcheritsyn PI. High-speed grinding. Moscow: Sverdlovsk: Mashgiz; 1953.
10. Yashcheritsyn PI, Zhalnerovich EA. Grinding of metals. Minsk: Belarus; 1963.
11. Yashcheritsyn PI. Improving the explantational properties of ground parts. Minsk: Nauka i Tekhnika; 1966.
12. Yashcheritsyn PI. Technological heredity and operational properties of ground parts. Minsk: Nauka i Tekhnika; 1971.
13. Yashcheritsyn PI, Zaitsev AG. Improving the quality of ground surfaces and cutting properties of abrasive diamond tools. Academy of Sciences of the BSSR. Minsk: Nauka i Tekhnika; 1972.
14. Yashcheritsyn PI, Olender LA, Nekhamkin EP. Modern methods and means of quality control of parts. Minsk: Belarus; 1975.
15. Yashcheritsyn PI, Zaitsev AG, Barbotko AI. Fine finishing processes of machining parts and devices. Academy of Sciences of BSSR. Minsk: Nauka i Tekhnika; 1976.
16. Yashcheritsyn PI, Ryzhov EV, Averbchenkov VI. Technological heredity in mechanical engineering. Minsk: Nauka i Tekhnika; 1977.
17. Yashcheritsyn PI. Technological and operational heredity and its influence on the durability of machines. Minsk: Nauka i Tekhnika; 1978.
18. Yashcheritsyn PI, Martynov AN, Gridin AD. Finishing of parts with a compacted flow of free abrasive. Minsk: Nauka i Tekhnika; 1978.
19. Yashcheritsyn PI, Sinitsyn BI, Zhigalko NI, Bass IA. Fundamentals of designing cutting tools using computers: textbook. Minsk: Vysshaya Shkola; 1979.
20. Yashcheritsyn PI, Eremenko ML, Zhigalko NI. Fundamentals of cutting materials and cutting tools: textbook. 2nd ed. Minsk: Vysshaya Shkola; 1981.
21. Yashcheritsyn PI, Dorofeev VD, Pakhalin YuA. ED dressing of diamond-abrasive tools. Minsk: Nauka i Tekhnika; 1981.
22. Yashcheritsyn PI, Borisenko AV, Drivotin IG, Lebedev VYa. Rotary cutting of materials. Academy of Sciences of the BSSR, Physics and Technology. Minsk: Nauka i Tekhnika; 1987.
23. Yashcheritsyn PI, Eremenko ML, Feldstein EA. Theory of cutting. Physical and thermal processes in technological systems: textbook. Minsk: Vysshaya Shkola; 1990.
24. Yashcheritsyn PI, Efremov VD. Metal-cutting machines: textbook. Minsk: Belarusian State Agrarian Technical University; 2001.
25. Efremov VD. Metal-cutting machines: textbook. 4th ed. Stary Oskol (Belgorod region): Tonkie Naukoemkie Tekhnologii; 2007.

Информация об авторах:

Суслов Анатолий Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, Лауреат Премии Правительства Российской Федерации в области образования, заслуженный ученый Брянской области, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, заслуженный работник Министерства образования Та-

джикистана, главный редактор журнала «Наукоемкие технологии в машиностроении»; международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 7102825210, Researcher-ID-Web of Science G-1042-2016, Author-ID-РИНЦ 3423; тел. 8-903-869-79-63.

Попков Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент, Почетный гражданин города

Брянска, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, почетный работник газовой промышленности, член-корреспондент Российской академии естественных наук, член Ассоциации инженерного образования России, член ред-

Suslov Anatoly Grigoryevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Laureate of the Government of the Russian Federation Prize in Education, Honored Scientist of Bryansk Region, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Honored Worker of the Ministry of Education of Tajikistan, Editor-in-chief of the journal Science Intensive Technologies in Machine Building; international identification numbers of the author: Scopus-Author ID 7102825210, Researcher-ID-Web of

коллегии журнала «Актуальная наука», международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 56363705400, Researcher-ID-Web of Science G-3869-2016, Author-ID-RSCI 615365; тел. 8-903-869-33-30.

Science G-1042-2016, Author-ID-RSCI 3423; phone 8-903-869-79-63.

Popkov Vladimir Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Honorary Citizen of Bryansk, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Honorary Worker of Gas Industry, Corresponding Member of journal Aktualnaya Nauka, international identification numbers of the author: Scopus-Author ID 56363705400, Researcher-ID-Web of Science G-3869-2016, Author-ID-RSCI 615365; phone: 8-903-869-33-30.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.



Научное издание

ТРАНСПОРТНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Редактирование	Н.Ю. Лакалина
Компьютерная верстка	В.А. Ерохина

Подписано в печать 15.07.25. Дата выхода в свет 30.07.25. Формат 60×84¹/₈.
Бумага офсетная. Офсетная печать. Усл. печ. л. 11,63. Уч.-изд. л. 12,5.
Тираж 500 экз. Свободная цена.

Учредитель и издатель – Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Брянский государственный технический университет»
(БГТУ)

Адрес редакции и издателя:
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».
241035, Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7, БГТУ, тел. (4832) 58-82-77.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии БГТУ,
241035, Брянск, ул. Институтская, 16