

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.488

doi: 10.30987/2782-5957-2025-10-55-61

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И НАДЕЖНОСТИ КОРПУСА АВТОСЦЕПКИ

Марат Григорьевич Крукович¹, Григорий Алексеевич Казакевич²✉

^{1,2} Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия

¹ ya.bormag@yandex.ru, <https://orcid.org/000-0001-5563-093X>

² kazakevichg@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-1542-979X>

Аннотация

Целью работы является необходимость повышения надежности и долговечности эксплуатации восстановленного сварочными технологиями корпуса автосцепки. В работе приведены результаты исследования процесса борирования из обмазок с применением нагрева ТВЧ, предназначенные для повышения износостойкости поверхностей контура зацепления и надежности работы корпуса автосцепки.

Этот метод позволяет получать борированные слои разной структурной модификации в широком температурном интервале от 700 до 1300 °С по диффузионному и диффузионно-кристаллизационному механизмам, соответственно. Применялись составы насыщающих обмазок на основе карбида бора, толщиной до 10 мм. Поверх насыщающей обмазки наносилась защитная на основе песка и борного ангидрида, толщиной до 15 мм. В работе применялись металлографический, дюрOMETрический методы исследования и испытания износостойкости.

Оценка хрупкости слоев проводилась путем определения напряжений скола.

Наиболее приемлемой для упрочнения контура зацепления является композиционная структура борированного слоя, которая на малоуглеродистой стали получена впервые. Повышение надежности работы корпуса автосцепки обеспечивается исправлением дендритной структуры наплавленного слоя, исправлением видманштеттовой структуры подслоя, устранением сварочных растягивающих остаточных напряжений и установлением на поверхности сжимающих остаточных напряжений, а также износостойкими свойствами композиционного борированного слоя, не обладающего хрупкостью и имеющего высокий запас пластичности.

Ключевые слова: борирование, износостойкость, композиционное строение слоя, напряжения скола, запас, пластичность, контур, зацепление, автосцепка, надежность.

Ссылка для цитирования:

Крукович М.Г. Повышение износостойкости и надежности корпуса автосцепки / М.Г. Крукович, Г.А. Казакевич // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 10. – С.55-61. doi: 10.30987/2782-5957-2025-10-55-61.

Original article

Open Access Article

INCREASED WEAR RESISTANCE AND RELIABILITY OF AUTOMATIC COUPLING BODY

Marat Grigoryevich Krukovich¹, Grigory Alekseevich Kazakevich²✉

^{1,2} Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

¹ ya.bormag@yandex.ru, <https://orcid.org/000-0001-5563-093X>

² kazakevichg@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-1542-979X>

Abstract

The paper objective is the need to increase the operation reliability and durability of the automatic coupling body restored by welding. The paper presents the study results of borating from coatings using HFC

heating, designed to increase the wear resistance of the surfaces of the coupler contour and the reliability of the coupling body.

This method makes it possible to obtain borated layers of various structural modifications in a wide temperature range from 700 to 1300 °C by diffusion and diffusion-crystallization mechanisms, respectively. Compositions of saturating coatings based on boron carbide, up to 10 mm thick, were used. A protective coating based on sand and boric anhydride, up to 15 mm thick, was applied over the saturating coating. The work used metallographic, durometric methods of research and testing of wear resistance. The brittleness of the layers was assessed by determining the chipping stresses.

The most suitable for strengthening the coupler contour is the composite structure of the borated layer,

Reference for citing:

Krukovich MG, Kazakevich GA. Increased wear resistance and reliability of automatic coupling body. Transport Engineering. 2025;10:55-61. doi: 10.30987/2782-5957-2025-10-55-61.

Введение

Надежность работы автосцепного устройства зависит от надежности работы каждой детали и отдельных ее участков, которые подвергаются интенсивному изнашиванию в результате работы в условиях сухого трения при наличии высоких контактных и ударных нагрузок. Эти детали изготавливают методом литья из низкоуглеродистых и низколегированных сталей марок 20ГЛ, 20ФЛ и 20ГФЛ, которые, обладая высоким запасом пластичности, обеспечивают работоспособность в течение определенного времени. Одной из этих деталей является корпус автосцепки.

Детали автосцепного устройства при эксплуатации испытывают высокие нагрузки, которые действуют в различных плоскостях. Сложная конструкция этих деталей и форма предъявляют высокие требования к технологии изготовления, ремонту и к системе контроля качеством. Переменный профиль деталей, особенно в переходных зонах от одного сечения к другому, создает дополнительные концентраторы напряжений.

Основными факторами, вызывающими повреждения корпуса автосцепки, являются:

- нарушение технологии изготовления и ремонта;
- высокие контактные и ударные нагрузки;
- износы из-за постоянного взаимодействия деталей друг с другом;
- значительные перепады температур

which was obtained for the first time of low-carbon steel. The increased reliability of the coupling body is ensured by correcting the dendritic structure of the deposited layer, correcting Widmanstätten structure of the sublayer, eliminating welding tensile residual stresses and establishing compressive residual stresses on the surface, as well as the wear-resistant properties of the composite borated layer, which is not brittle and has a high margin of plasticity.

Keywords: borating, wear resistance, composite structure of the layer, chipping stresses, margin, plasticity, contour, coupling, auto-coupling, reliability.

при эксплуатации;

– отсутствие защиты от попадания абразивных частиц и влаги из внешней среды в зоны трения.

Результатом воздействия этих факторов при работе корпуса автосцепки являются образование трещин в местах наличия внутренних и внешних концентраторов напряжений и интенсивное изнашивание отдельных участков контура зацепления. Контур зацепления представляет собой горизонтальную проекцию зубьев, зева и выступающей части замка.

В частности, интенсивность изнашивания рабочих поверхностей литых деталей грузовых вагонов равна 1,2...2,0 мм/10⁵ км пробега. Это значение обеспечивает 210 тыс. км. пробега новых деталей при величине допустимого износа 3 мм [1], что составляет 3 года эксплуатации, после которого детали подвергаются восстановлению сварочными технологиями. Количество таких восстановлений в идеальном случае за весь срок службы может достигать 10 раз. При этом установлено, что применяемые сварочные материалы и технология для восстановления деталей обеспечивают пробег только 160 тыс. км, сокращая межремонтный период эксплуатации до 2 лет. Причиной этого сокращения и снижения надежности работы восстановленных деталей является накопление повреждаемости основного металла при многократных нагревах во время наплавки, дендритное строение

наплавленного металла, видманштеттовая структура подслоя и наличия растягивающих сварочных остаточных напряжений на поверхности.

Совершенствование процессов наплавки позволяют в настоящее время повысить пробег деталей автосцепки по параметру износостойкости до 500 тыс. км за счет применения покрытых электродов, применением частично механизированной наплавки порошковым электродом в среде защитных газов или применением защитной порошковой проволоки [2]. Однако, это не устраняет отрицательного влияния дефектов наплавленного металла, образования хрупкой видманштеттовой структуры в подслое за счет перегрева и образования в отдельных местах растягивающих напряжений. Применение же отжига в данном случае снимает положительный эффект от закаленной структуры игольчатого феррита. Следовательно, не обеспечивается гарантия надежности работы автосцепки по структурным и прочностным параметрам используемых материалов.

Применение закалки с нагревом ТВЧ

Результаты исследований и их обсуждение

Отдельные изношенные участки наружных и внутренних поверхностей головки корпуса автосцепки для восстановления размеров во время ремонта подвергаются наплавке с применением различных сварочных технологий [2, 6, 7]. Эти процессы сопровождаются высокотемпературным нагревом до 1500-1600°C и повышением хрупкости за счет литой структуры наплавленного металла и зоны термического влияния. Надежность эксплуатации таких восстановленных поверхностей корпуса автосцепки значительно снижается, которая проявляется в повышении количества отказов при интенсивном изнашивании восстановленных поверхностей и образовании сколов.

Анализ различных методов упрочнения изнашиваемых поверхностей крупногабаритных деталей, к которым относится корпус автосцепки, показал, что для местного повышения износостойкости отдельных участков поверхностей наиболее приемлемой является технология борирования

для повышения твердости тяговых поверхностей большого и малого зубьев головки корпуса автосцепки [3] обеспечивает некоторый положительный эффект по износостойкости, однако получаемая структура отпущенного мартенсита все же обладает твердостью, высоким уровнем напряжений и хрупкостью. Более того мартенсит отпуска является неравновесной и нестабильной структурой, которая при нагреве стремится к равновесию и распаду на троостит с понижением твердости и хрупкости. Повышение температуры в микрообъемах на поверхностях трения при высоких давлениях и ударных нагрузках имеет очень высокую вероятность [4, 5]. Поэтому данная технология также не обеспечит значительное повышение надежности и долговечности упрочненным участкам корпуса автосцепки.

Таким образом, целью данной работы является поиск метода поверхностного упрочнения изнашиваемых участков поверхностей головки корпуса автосцепки, обеспечивающего повышение ее надежности в эксплуатации.

из паст и обмазок с использованием нагрева токами высокой частоты, которая имеет следующие преимущества:

- возможность упрочнения отдельных изнашиваемых поверхностей;
- широкий температурный интервал нагрева (700...1300 °С);
- возможность получения слоев с различной структурной морфологией и свойствами в интервале твердости от 250 до 2200 кгс/мм²;
- возможность получения композиционных слоев, толщиной до 3 мм и более;
- кратковременность обработки от нескольких секунд до нескольких десятков минут.

Формирование борированных слоев с различной структурной морфологией и толщиной на основе α – твердого раствора, компактных боридов и композиционного строения происходит по двум механизмам: диффузионному и диффузионно-кристаллизационному [8]. При диффузионном механизме формирования борированных сло-

ев обрабатываемая поверхность находится в твердом агрегатном состоянии, а при диффузионно-кристаллизационном – в жидкотвердом состоянии, что и обеспечивает формирование слоев различной толщины от 0,2 мм до 2 и более мм, соответственно. Рекомендации по получению слоев значительной толщины [9, 10] не обеспечивают технологическую устойчивость и воспроизводимость результатов.

Таким образом, условия получения различных структур борированных слоев обеспечивалось величиной высокочастотного тока при непрерывном нагреве, прерывистым нагревом при максимальной величине тока, составом насыщающих обмазок, продолжительностью обработки и горизонтальным или наклонным расположением борлируемых поверхностей корпуса автосцепки. При этом для корпуса автосцепки грузовых вагонов требуемая твердость более 250 НВ обеспечивается борированными слоями на основе α -твердого раствора с минимальным количеством включений боридов и карбоборидов, а для пассажирских вагонов – с твердостью более 520 НВ на основе 25 % α -твердого раствора и 75 % боридных включений.

Следует отметить, что борированию с образованием композиционного слоя можно подвергать как поверхности новых автосцепок, так и поверхности после восстановления методами сварки. В первом случае обеспечивается повышение твердости и износостойкости, уменьшение дефектности поверхности за счет частичного переплава и снижения коэффициента трения во время эксплуатации. Во втором случае при нагреве происходит перекристаллизация и исправление хрупкой дендритной структуры наплавленного слоя и видманштеттовой структуры подслоя, а также получения на поверхности высокой твердости, износостойкости и сжимающих остаточных напряжений на поверхности за счет слоя, что является весьма положительным для надежной эксплуатации корпуса автосцепки.

Одним из показателей надежности работа деталей для компактных материалов является ударная вязкость, а для наплавленных и диффузионных слоев такой оценочной характеристикой хрупкости

является напряжение скола ($\sigma_{скв}$, кгс/мм²). Это минимальное напряжение, вызывающее скол слоя при измерении микротвердости на различном расстоянии от края образца.

$$\sigma_{ск} = \frac{0,174P}{2l^2 + lc} \quad (1)$$

где P – нагрузка при измерении микротвердости, кгс; l – расстояние от центра отпечатка пирамиды до края образца, мм; c – диагональ отпечатка, мм.

Эта величина интегрально учитывает природные свойства фаз слоя (микротвердость, модуль упругости) и его состояние (фазовый состав и их соотношение, дисперсность и взаимное расположение в слое и на поверхности, напряженное состояние, текстурированность, запас пластичности и т.п.). Напряжение скола имеет хорошую корреляцию с микротвердостью (рисунок), а для анализируемых материалов показывает высокий запас пластичности и надежность работы композиционных борированных слоев. При этом включения боридов и карбоборидов с твердостью 1500 МПа выполняют роль опорной поверхности, а сравнительно мягкий α – твердый раствор с твердостью ~ 300...450 МПа обеспечивает релаксацию эксплуатационных напряжений.

В зависимости от количества боридов и карбоборидов в композиционной структуре борированных слоев их микротвердость изменяется в широких пределах от 1580 до 520 кгс/мм² при сохранении большого запаса пластичности. В то же время в случае необходимости могут быть получены слои, содержащие бор, только на основе α – твердого раствора с микротвердостью ~ 250...300 кгс/мм².

Сравнительные экспрессные испытания износостойкости на машине типа Шкоды-Савина стали 20ГФЛ в различном состоянии и с различными структурами борированных слоев (таблица) показали высокую работоспособность и надежность композиционных слоев, полученных из обмазок с нагревом ТВЧ.

Испытания проводились при трении скольжения без смазывающего материала. В качестве контртела использовали диск твердого сплава ВК6 диаметром 60 мм и

толщиной 2,4 мм при нагрузке 2,5 кгс и скорости вращения диска 760 об/мин.

Насыщение бором исследуемых образцов стали 20ГФЛ проводили из обмазок, содержащих (% по массе):

80%(50 %Al₂O₃+50 %B₄C)+20 %Na₃AlF₆; и 80 %B₄C+20 %Na₃AlF₆. Первая смесь обеспечивала образование однофазных борированных слоев (Fe₂B), а вторая – двухфазных слоев (FeB + Fe₂B).

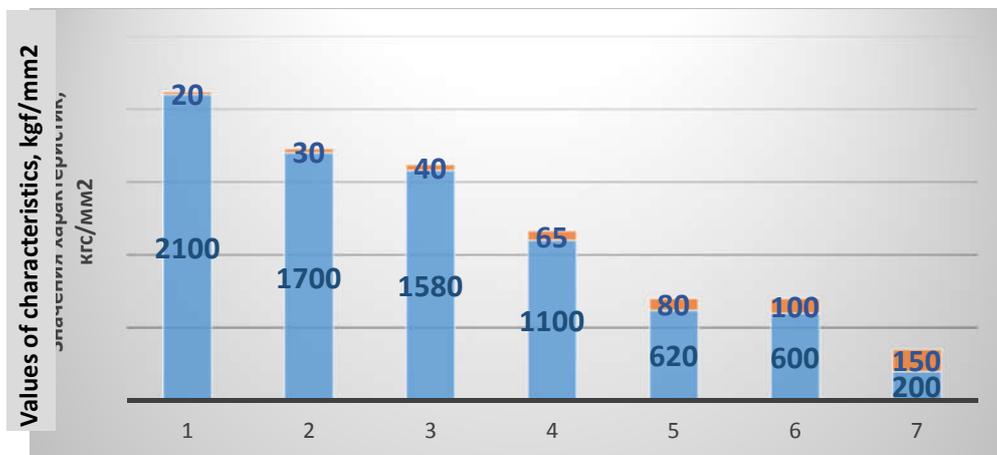


Рисунок. Зависимость микротвердости и напряжений скола от фазового состава однофазных и композиционных диффузионных борированных слоев:

- 1 – FeB; 2 – Fe₂B; 3 – 90% Fe₂B + 10% α – твердый раствор; 4 – 50% Fe₂B + 50% α – твердый раствор; 5 – 10% Fe₂B + 90% α – твердый раствор; 6 – 100% закаленной напряженной мартенситной структуры; 7 – феррито-перлитная структура после отжига

Figure. Dependence of microhardness and shear stress on the phase composition of single-phase and composite diffusion borated layers:

- 1 – FeB; 2 – Fe₂B; 3 – 90% Fe₂B + 10% α – solid solution; 4 – 50% Fe₂B + 50% α – solid solution; 5 – 10% Fe₂B + 90% α – solid solution; 6 – 100% quenched stressed martensite structure; 7 – ferrite-pearlite structure after annealing

Таблица

Влияние структурного состояния поверхности стали 20ГФЛ на износостойкость

Table

The effect of the structural state of the surface of steel 20GFL on the wear resistance

| Вид поверхности | Объем лунки (мм ³) при продолжительности испытаний, мин | | | | | |
|--|---|-------|-------|-------|------|------|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| Отожженное состояние (Ф+П, 200 НВ) | 1,10 | 1,9 | 2,7 | 3,5 | 4,1 | 5 |
| Закаленное состояние (M _{отп} , 440 НВ) | 0,42 | 0,7 | 0,942 | 1,29 | 1,35 | 1,84 |
| Борированный слой (FeB, 2100 кгс/мм ²) | 0,029 | 0,039 | 0,065 | 0,106 | 0,2 | 0,25 |
| Борированный слой (Fe ₂ B, 1700 кгс/мм ²) | 0,037 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,25 | 0,3 |
| Борированный слой (композиционная структура, 25 % Fe ₂ B, 500 НВ) | 0,04 | 0,051 | 0,08 | 0,12 | 0,22 | 0,33 |

После взвешивания исходных компонентов и тщательного перемешивания порошковой смеси насыщающая обмазка из них готовилась на связующем, в качестве которого использовался клей БФ-2. Полученная обмазка в пастообразном состоянии шпателем наносилась на обрабатываемые поверхности. Толщина слоя составляла 10 мм.

Поверх насыщающей обмазки после сушки при 85 °С наносили слой защитной

обмазки: 40...60 % В₂O₃ + 60...40 % SiO₂, замешанной на смеси клея БФ-2 с ацетоном в соотношении 4:1, которая предотвращала окисление карбида бора и выход образующейся насыщающей газовой среды при нагреве в окружающее пространство. Толщина этого слоя составляла 15 мм.

Борированные слои на основе боридов были получены при 1000 °С, а композиционные слои – при 1120 °С. Т.е. в первом случае обеспечивался диффузионный

механизм формирования слоя в твердом агрегатном состоянии обрабатываемых поверхностей, во втором – диффузионно-кристаллизационный механизм при жидкотвердом состоянии поверхностей образцов. Поддержание температуры на заданном уровне в течение 10 мин при нагреве ТВЧ обеспечивалось периодическим отключением индуктора (5...10 с нагрев + 5...10 с выдержка при выключенном индукторе).

Принимая во внимание, что с использованием композиционных структур борированных слоев, имеющих высокий запас пластичности, повышается износостойкость в 5,5 раз по сравнению с закаленным состоянием и в 13 раз по сравнению с

отожженным состоянием, а также отсутствие фазовых превращений в слое при возможном повышении температуры во время эксплуатации и сохранении при этом твердости, следует ожидать повышение надежности и долговечности работы упрочненных поверхностей корпуса автосцепки. Для восстановленных поверхностей корпуса автосцепки создаются условия надежной эксплуатации в течение 3 лет, вместо 2, а для вновь изготовленных – обеспечивается возможность превышения максимального срока службы. В целом максимального эффекта следует ожидать при упрочнении борированием всех взаимодействующих изнашиваемых поверхностей контура зацепления.

Заключение

Представленные результаты показывают хорошие перспективы применения композиционных борированных слоев для повышения износостойкости отдельных изнашиваемых поверхностей контура зацепления корпуса автосцепки и надежности его работы. При этом создаются условия исправления дендритной и видман-

штеттовой структур, возникающих при восстановлении наплавкой изношенных поверхностей корпуса автосцепки методами сварочного производства, и продлении их срока службы до 3 лет. Более того упрочнению борированием могут подвергаться и новые изнашиваемые поверхности контура зацепления корпуса автосцепки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Абраменко Д.Н. Повышение износостойкости литых деталей грузовых вагонов дуговой наплавкой слоя стали со структурой игольчатого феррита / Автореферат дисс. канд. техн. наук. 2008. ВНИИЖТ. 05.16.01.
2. Ступин Д.А., Абраменко Д.Н. Технологии ремонта сваркой деталей автосцепки СА-3 на вагонах // XVI Международная научно-техническая конференция «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты», 12 - 14 июля 2022г. /http/Wagon-cargo.ru/news/teknologii-remonta-svarkoy-avtostseпки-ca-3-na-vagonakh.
3. Савушкин Р. А., Кякк К. В., Тереньев М.И., Безобразов Ю.А., Бройтман О.А., Дзалиев С.В., Перевалов Ю.Ю. Способ создания твердого поверхностного слоя на детали автосцепки грузового вагона. Пат. РФ № 2673437 С1. Оpubл. 26.11.2018.
4. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях. М.: Машиностроение, 1986, 224 с.
5. Крукович М.Г., Тонэ Э.Р. Трибологические материалы. Учебное пособие. М.: МИИТ, 2007. 104 с.
6. Абраменко Д.Н. Микроструктура металла износостойкой наплавки деталей грузовых вагонов: Железнодорожный транспорт на современном этапе. Задачи и пути их решения// Сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ» / Под ред. А.Е. Семечкина. М.: Интекст. 2008. С. 189-195.
7. Бычковский В.С., Карпов А.В., Филиппенко Н.Г. Технология ремонта корпуса автосцепки СА-3 грузового вагона // Молодой ученый. – 2015. -№ 12 (92). С. 152 – 156. — URL: <https://moluch.ru/archive/92/20161/> (дата обращения: 13.12.2024).
8. Крукович М.Г., Прусаков Б.А., Сизов И.Г. Пластичность борированных слоев. М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2010. 384 с.
9. Шевчук Е.П., Плотников В.А., Джес А.В. Формирование обширной диффузионной зоны при борировании стали 20 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. Т. 15 № 3, 2018. С. 424 – 428.
10. Ситкевич М.В., Дашкевич В.Г. Технологические особенности получения термодиффузионных боридных слоев в условиях ТВЧ-нагрева // Перспективные материалы и технологии: материалы международного симпозиума 22-26 мая 2017: в 2 ч. / под ред. В.В. Рубаника. Витебск: ВГТУ, 2017. Ч. 2. С. 21-23.

REFERENCES

1. Abramenko DN. Increasing the wear resistance of cast parts of freight cars by arc welding of a steel layer with a needle ferrite structure [abstract of dissertation]. [Moscow (RF)]; Railway Research Institute of JSC Russian railways; 2008.
2. Stupin DA, Abramenko DN. Welding repair technologies for SA-3 coupling parts on cars. XVI International Scientific and Technical Conference, July 12-14, 2022: Rolling Stock of the XXI Century: Ideas, Requirements, Projects [Internet]. Available from: <http://Wagon-cargo.ru/news/tehnologii-remonta-svarkoy-avtostseпки-ca-3-na-vagonakh>.
3. Savushkin RA, Kyakk KV, Terenyev MI, Bezobrazov YuA, Broitman OA, Dzhliev SV, Perevalov YuYu. RF Patent No. 2673437 C1. Method of creating a solid surface layer on the parts of the coupling of a freight car. 2018 Nov 26.
4. Drozdov YuN, Pavlov VG, Puchkov VN. Friction and wear in extreme conditions. Moscow: Mashinostroenie; 1986.
5. Krukovich MG, Tone ER. Tribological materials: textbook. Moscow: MIIT; 2007.
6. Abramenko DN. Microstructure of metal of wear-resistant surfacing of freight car parts. Proceedings of Railway Research Institute of JSC Russian railways, 2008: Railway Transport at the Present Stage. Tasks and Ways to Solve Them. Moscow: Intekst; 2008.
7. Bychkovsky VS, Karpov AV, Filippenko NG. Repair technology of SA-3 coupling body of a freight car. Young Scientist [Internet]. 2015;12(92):152-156 [cited 2024 Dec 13]. Available from: <https://moluch.ru/archive/92/20161/>
8. Krukovich MG, Prusakov BA, Sizov IG. Plasticity of borated layers. Moscow: FIZMATLIT; 2010.
9. Shevchuk EP, Plotnikov VA, Jes AV. Formation of an extensive diffusion zone during boration of steel 20. Basic Problems of Material Science. 2018;15(3):424-428.
10. Sitkevich MV, Dashkevich VG. Technological features of obtaining thermodiffusion boride layers under HFC heating conditions. Proceedings of the International Symposium, May 22-26, 2017: Advanced Materials and Technologies. Vitebsk: VSTU; 2017.

Информация об авторах:

Крукевич Марат Григорьевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», Российский университет транспорта (МИИТ), тел. +7(916)621-22-89.

Krukovich Marat Grigoryevich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Technology of Transport Engineering and Repair of Rolling Stock, Russian University of Transport (MIIT), phone: +7(916)621-22-89.

Казакевич Григорий Алексеевич – аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», Российский университет транспорта (МИИТ), тел.: +7 926 255-38-44.

Kazakevich Grigory Alekseevich – Postgraduate student at the Department of Technology of Transport Engineering and Repair of Rolling Stock, Russian University of Transport (MIIT), phone: +7 926 255-38-44.

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 05.09.2025; одобрена после рецензирования 23.09.2025; принята к публикации 26.09.2025. 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 05.09.2025; approved after review on 23.09.2025; accepted for publication on 26.09.2025. 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*.