

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.488

doi: 10.30987/2782-5957-2024-7-40-46

## ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ БОРИРОВАННЫХ СЛОЕВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ НАГРЕВЕ ТВЧ, ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Марат Григорьевич Крукович<sup>1✉</sup>, Григорий Алексеевич Казакевич<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Российский университет транспорта, Москва, Россия

<sup>1</sup> bormag@beehive.miit.ru

<sup>2</sup> kozakevihGA@gmail.com

### Аннотация

В работе представлен технологический процесс местного борирования слоев среднеуглеродистых сталей из обмазок с нагревом ТВЧ. Сравнительные исследования изнашивания борированных слоев с различной морфологией показали преимущества слоев с композиционной структурой в широком интервале скоростей скольжения от 0,05 до 3 м/с. Максимальное время эффективной защиты обеспечивают борированные слои с сочетанием компактной структуры с композиционной при

жестких условиях эксплуатации. Условный пересчет результатов изнашивания борированных образцов в жестких условиях позволяет предположить достижение пробега клинового гасителя колебаний в общесетевых условиях более 600 тыс. км.

**Ключевые слова:** борирование, структура, износостойкость, защита, перерасчет, пробег, подвижной состав, гаситель колебаний.

Ссылка для цитирования:

Крукович М.Г. Износостойкость композиционных борированных слоев, полученных при нагреве твч, для упрочнения деталей подвижного состава / М.Г. Крукович, Г.А. Казакевич // Транспортное машиностроение. – 2024. – № 7. – С. 40-46. doi: 10.30987/2782-5957-2024-7-40-46.

Original article

Open Access Article

## WEAR RESISTANCE OF COMPOSITE BORATED LAYERS OBTAINED BY HIGH FREQUENCY CURRENT (HFC) HEATING FOR HARDENING ROLLING STOCK PARTS

Marat Grigorievich Krukovich<sup>1✉</sup>, Grigory Alekseevich Kazakevich<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Russian University of Transport, Moscow, Russia

<sup>1</sup> bormag@beehive.miit.ru

<sup>2</sup> kozakevihGA@gmail.com

### Abstract

The paper presents the technological process of local borating of medium carbon steellayers from coatings and HFC heating. Comparative studies of the wear of borated layers with different morphologies show the advantages of layers with a composite structure in a wide range of sliding speeds from 0.05 to 3 m/s. The maximum effective protection time is provided by borated layers which combine a compact structure with a

composite one under harsh operating conditions. Conditional recalculation of the wear results of borated samples in harsh conditions allows assuming that running of the wedge-type shock absorber in general conditions is more than 600 thousand km.

**Keywords:** borating, structure, wear resistance, protection, recalculation, running, rolling stock, shock absorber.

Reference for citing:

Krukovich MG, Kazakevich GA. Wear resistance of composite borated layers obtained by high frequency current (HFC) heating for hardening rolling stock parts. Transport Engineering. 2024;7:40-46. doi: 10.30987/2782-5957-2024-7-40-46.

## Введение

Одной из задач при производстве изнашиваемых деталей подвижного состава и их ремонте является обеспечение периода их эксплуатации до текущего ремонта. С целью повышения износостойкости фрикционных планок, фрикционных клиньев, буксовых наличников, скользунов, которые относятся к быстроизнашиваемым деталям подвижного состава, требующих повышения своей работоспособности применяют борирование. Это устраняет необходимость преждевременной замены вышедших из допустимых размеров изношенных деталей со всеми сопутствующими проблемами.

Имеющиеся рекомендации по упрочнению подобных деталей (в частности наличников букс) электролизным и порошковым борированием [1, 2], хотя и приводят к повышению износостойкости

## Результаты исследований и их обсуждение

Гетерогенные борированные слои значительной толщины, состоящие из смеси дисперсных боридов и  $\alpha$ -твердого раствора, обладают высокой пластичностью и достаточной износостойкостью. Их суммарная твердость составляет  $\sim 12000$  МПа. Компактные слои на основе боридов имеют твердость 16000 МПа (однофазные слои на основе  $\text{Fe}_2\text{B}$ ) и 22000 МПа (двухфазные слои на основе  $\text{FeB}+\text{Fe}_2\text{B}$ ).

Композиционные слои получают при лазерной и электронно-лучевой обработке рабочих поверхностей деталей, при нагреве токами высокой частоты, при использовании традиционного печного нагрева и в других случаях [4, 5]. Формирование этих борированных слоев происходит по диффузионно-кристаллизационному механизму в жидкокристаллическом состоянии отдельных участков слоя. Качество получаемых слоев в этом случае определяется температурным режимом обработки и составом насыщающей смеси.

Таким образом, композиционная структура слоев, построенная по принципу «структуры Шарпи», во время изнашивания приобретает микрорельеф за счет структурной неоднородности, хорошо удерживает смазывающий материал, со-

все же не нашли широкого применения. Основной причиной этого является недостаточная толщина получаемых компактных борированных слоев, их высокая твердость и хрупкость. Высокая твердость приводит к изнашиванию сопряженной детали, а хрупкость приводит к сколам слоев и переводу узла трения к абразивному виду изнашивания. В то же время имеются рекомендации по получению гетерогенных борированных слоев значительной толщины (до 2,5 мм) [3]. Однако эти разработки еще не вышли из уровня лабораторных исследований.

Таким образом, целью данной работы является проведение сравнительных исследований по износостойкости компактных и гетерогенных композиционных борированных слоев.

храняет опорную твердую поверхность за счет боридов и сохраняет высокую износостойкость. Более того, композиционные борированные слои имеют низкое напряженное состояние, в связи с релаксацией напряжений в пластичном твердом растворе.

При изнашивании большое число механизмов этого взаимодействия и их тесная взаимосвязь не позволяют провести четкую границу между ними и разделить на группы, которые позволили бы проводить прогностические расчеты с высокой степенью достоверности. Следует заметить, что двойственность процессов трения играет решающую роль в изнашивании деталей и инструментов. Поэтому его виды могут быть разделены по тому вкладу, который вносят деформация и адгезия в изнашивание. При этом адгезионное и усталостное изнашивание занимают крайние положения, поскольку усталость обусловлена в первую очередь деформационными процессами, а схватывание играет решающую роль в адгезионном изнашивании. Таким образом, на поверхностях  $\alpha$ -твердого раствора композиционной структуры проходят деформационные и адгезионные процессы, а на поверхностях включений

боридов наблюдается физико-механическое изнашивание. Скорость же суммарного изнашивания будет определяться структурным соотношением этих составляющих. Количественная взаимосвязь соотношения структурных составляющих с величиной износа создает условия управления процесса изнашивания и его прогнозирования.

В то же время фрикционное взаимодействие всегда происходит в определенной среде, которая оказывает значительное влияние на трибологические процессы, связанные с химическим активированием поверхностей трения, повышением температуры и разрыхлением подповерхностного слоя. Это в конечном итоге приводит к образованию вторичных структур, которые экранируют контактирующие поверхности от прямого взаимодействия. Такие процессы в конечном итоге изменяют скорость деформирования и прочность адгезионных связей, но эти явления по-прежнему продолжают играть ведущую роль в изнашивании композиционной структуры с добавлением влияния вторичных структур. В результате это приводит к снижению коэффициента трения и величины износа.

Композиционные структуры борированных слоев формируются по диффузионно-кристаллизационному механизму, который обеспечивает максимальную скорость роста слоя за счет частичного оплавления обрабатываемой поверхности. При этом для сохранения металлического каркаса и формы поверхности количество жидкой составляющей не должно превышать ~ 30 %. Температура начала перехода из твердого состояния в жидкое для среднеуглеродистых низколегированных сталей составила ~ 1150...1100 °С, а для высокоуглеродистых легированных конструкционных сталей ~ 1050...1000 °С.

Борирование исследуемых образцов из стали 30 проводили из обмазок следующих составов (% вес.):

1. 80(50Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+50B<sub>4</sub>C)+20Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>;
2. 80B<sub>4</sub>C+20Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>.

Поверх активной насыщающей обмазки после сушки наносили слой защитной обмазки: 40-60% В<sub>2</sub>О<sub>3</sub> + 60-40 % SiO<sub>2</sub>, замешанной на смеси клея БФ-2 с

ацетоном в соотношении 4:1. Обмазки (насыщающую и защитную), толщиной 1,5-2,5 мм, наносили на изделия погружением в сметанообразную смесь. После нанесения каждого слоя пасты образцы просушивали в сушильном шкафу (при 100-250°С в течение 0,5-2,0 ч). Защитную обмазку использовали для того, чтобы предотвратить окисление карбида бора и предотвратить выход образующейся насыщающей газовой среды при нагреве в окружающее пространство.

В процессе насыщения на обрабатываемой поверхности стали 30 в течение 15 с достигалась температура 1150 °С. Поддержание температуры на заданном уровне в течение 10 мин обеспечивалось периодическим отключением индуктора (15 с нагрев + 15 с выдержкой при выключенном индукторе). Поверхность незначительно подплавлялась, что обеспечивало формирование композиционного борированного слоя, толщиной 0,8...1,3 мм. Твердость слоя составила 11500 МПа. Частичное оплавление обрабатываемой поверхности на приводило к изменению ее шероховатости. Очистка образцов от остатков пасты проводилась механическим способом с помощью металлических щеток.

Сравнительные испытания износостойкости, представленные выше (табл. 1), показали хорошую работоспособность композиционных борированных слоев по сравнению с компактными боридными слоями игольчатого строения.

По мере увеличения скорости скольжения изменяется механизм изнашивания с механической формы на окислительный, при этом за счет образования вторичных структур износ становится одинаковым для всех видов борированных слоев. В то же время этот износ в несколько раз меньший, чем износ закаленных сталей и других различных износостойких слоев (азотированных, цементованных, нитроцементованных и др.).

Важной характеристикой эксплуатации борированных деталей является эффективное время защиты от изнашивания, которое определяет их долговечность. Это время защиты фиксировалось

в процессе изнашивания до достижения контртелом структуры основы. Для испытаний были подготовлены образцы с соиз-

меримой толщиной борированных слоев различной морфологии (табл. 2).

Таблица 1

Приведенный износ борированных слоев разной структурной морфологии на стали 30

*Table 1*

*Reduced wear of borated layers of different structural morphology on steel 30*

№№ п/п	Скорость скольжения, м/с	Величина приведенного износа (мкм/км) разных видов борированных слоев		
		Двухфазный (FeB + Fe <sub>2</sub> B)	Однофазный (Fe <sub>2</sub> B)	Композиционный (FeB + Fe <sub>2</sub> B + α – твердый раствор)
1	0,05	47	23	9
2	0,1	38	11	6,5
3	0,5	7	5,0	2,5
4	1,0	3,5	3,0	1,2
5	3,0	2,5	2,0	1,0
6	5,0	1,0	1,0	1,0

Примечание: удельное давление – 10 кгс/см<sup>2</sup>. Контртело – твердый сплав ВК6.

Таблица 2

Влияние морфологии борированных слоев на время эффективной защиты

*Table 2*

*The effect of the morphology of borated layers on the time of effective protection*

№ п/п	Структура слоя	Толщина слоя, мм	Время эффектив- ной защиты, ч	Примечание
1	Компактный слой боридов (FeB+Fe <sub>2</sub> B)	0,25	35	При большей толщине слоя наблюдается скаль- вание
2	Псевдоэвтектический слой (α-твердый раствор + бориды)	0,4	120	-
3	Сочетание компактной структуры бо- ридов и псевдоэвтектической зоны	0,3	160	-

Это борированный двухфазный компактный слой на основе (FeB + Fe<sub>2</sub>B), псевдоэвтектический композиционный борированный слой на основе α – твердого раствора с включениями боридов и модернизированный борированный слой с сочетанием компактной и псевдоэвтектической композиционной структуры.

Процесс борирования проводили в смеси, содержащей (% по массе): 70 % В<sub>4</sub>С + 10 % Na<sub>2</sub>В<sub>4</sub>О<sub>7</sub>+ 15 % Al<sub>2</sub>О<sub>3</sub>+ 5 % Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>. Смесь в контейнере с образцами изолировали от окисления плавким затвором, состоящим из песка (SiO<sub>2</sub>) и борного ангидрида (В<sub>2</sub>О<sub>3</sub>). Компактный слой был получен при непрерывной выдержке в контейнере с насыщающей смесью в течение 5 ч при 950 °С. Толщина слоя составила 0,2 мм.

Псевдоэвтектическая структура на стали 35ХГН получена при обработке в течение 3 ч при температуре 1115°С, которая обеспечивала жидкокристаллическое состояние поверхности с минимальным количеством жидкого раствора. Толщина такого слоя равна 0,4 мм (рисунок).

Сочетание компактного слоя боридов и переходного композиционного с дисперсным распределением боридов в α – твердом растворе была получена при диффузионном и диффузионно-кристаллизационном механизмах массопереноса по ступенчатому температурному режиму: один час при 1115 °С и 2 часа при 950 °С. Толщина полученного слоя составила 0,3 мм.

Такая структура может быть получена и при температуре 1090 °С. Достижение

жидкокристаллического состояния в отдельных участках подслоя происходит за счет его обогащения легирующими элементами, углеродом, серой и фосфором, которые оттесняются от поверхности растущим слоем боридов.

Сравнительные испытания износостойкости при трении скольжения полученных борированных слоев с разной морфологической структурой на стали 35ХГН с последующей закалкой показали значительное повышение эффективного времени защиты от изнашивания структуры, состоящей из сочетания компактной

зоны боридов с псевдоэвтектической в жестких условиях исследования (табл. 2).

Исследованные слои получены в течение 3 ч при следующих температурных режимах: 1 – 950 °С; 2 – 1115 °С; 3 – 1150 °С (1 ч) и 950 °С (2 ч)

Испытания проводились при трении скольжения без смазывающего материала на машине типа Шкоды-Савина. В качестве контртела использовали диск твердого сплава ВК6 диаметром 60 мм и толщиной 2,4 мм при нагрузке 2,5 кгс при скорости вращения 760 об/мин.



а)



б)

Рисунок. Микроструктуры борированных слоев на стали 35ХГН (x 200):

а – двухслойная модернизированная структура после ступенчатого режима;

б – двухфазная компактная структура после изотермической выдержки в твердом состоянии

*Figure. Microstructures of boron layers on steel 35KHGN (x 200): a – a two-layer upgraded structure after a stepwise regime; b - a two-phase compact structure after isothermal exposure in a solid state*

Результаты износостойкости в жестких условиях испытаний были условно пересчитаны для оценки пробега реальных деталей подвижного состава по формуле:

$$D = V_{\text{привед}} \cdot L \cdot v \cdot y \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2, \quad (1)$$

где  $D$  – рассчитываемая величина пробега, км;  $V_{\text{привед}}$  – величина приведенного износа, для рассматриваемых условий изнашивания  $V_{\text{привед}} = 9$  мкм/км (табл. 1);  $L$  – расчетная база величины пробега для условий испытаний изнашивания, км;  $v$  – скорость скольжения или амплитуда перемещения сопряженных деталей (в условиях испытаний  $v = 0,05$  м/с; амплитуда перемещения сопряженных деталей автосцепки для расчета составляет  $v = 7...10$  мм [6];  $y$  – толщина износостойкого

борированного слоя, мкм;  $\alpha_1$  – коэффициент соотношения твердости пары трения в жестких условиях испытаний износостойкости,  $\alpha_1 = HV_{\text{контр}}/HV_{\text{дет1}} = 10$ ;  $HV_{\text{контр}}$  – твердость контртела, 2500 кгс/мм<sup>2</sup>;  $HV_{\text{дет}}$  – твердость детали, 250 кгс/мм<sup>2</sup>;  $\alpha_2$  – усредненный коэффициент повышения износостойкости борированных сталей по отношению к неборированным (для композиционных слоев  $\alpha_2 = 10$ ).

При базовой величине пробега в жестких условиях испытаний износостойкости, равной 300 км, и приведенной величине износа, равной 3 мкм/км при скорости скольжения 0,005 м/с, толщина изношенного слоя составит 900 мкм. Следовательно, для принятой толщины компози-

ционного борированного слоя 2,0 мм пробег в жестких условиях окажется равным 660 км. Вводя в расчет значения коэффициентов  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и амплитуду перемещения, равную 10 мм получим оценку величины пробега в реальных условиях, равную 660 тыс. км.

Эта величина хорошо коррелирует с нормативной величиной пробега после изготовления фрикционной и контактной планки, равной 210 тыс. км, с величиной пробега фрикционного клина 160 тыс. км. После замены материала на серый чугун марки СЧ 35 было достигнуто увеличение межремонтного срока фрикционного узла со 160 тыс. км до 210 тыс. км [7-9]. Оптимизация материалов и применение термической обработки в виде объемно-поверхностной закалки при твердости фрикционного клина 380...450 *HV* и составной фрикционной планки с твердостью 360...420 *HV* позволило повысить величину пробега до 300...350

## Заключение

В результате исследования технологического процесса местного борирования стали 30, 35ХГН из образцов с нагревом ТВЧ определены температурные условия формирования борированных слоев с композиционной структурой. Проведенные сравнительные исследования изнашивания борированных слоев с различной морфологией показали преимущества слоев с композиционной структурой в широком интервале скоро-

тыс. км, а при использовании высокопрочного чугуна (ВЧ 120 с полиуретановой накладкой) с твердостью 415...480 *HV* повысить величину пробега более 500 тыс. км.

Следует заметить, что обеспечение пробега клиньев из стали 20ГЛ после поверхностно-объемной закалки, равное 500 тыс. км, достигнутое при испытаниях на Экспериментальном кольце, дает возможность гарантировать получение пробега вагонов в общесетевых условиях на уровне 1,0...1,5 млн. км [6].

Предлагаемая технология позволяет обрабатывать любые изнашиваемые поверхности получением различной твердости. При борирования с получением композиционной структуры двух сопряженных поверхностей величина пробега клинового гасителя колебаний может достичь 1,0 млн. км.

стей скольжения от 0,05 до 3 м/с. При этом максимальное время эффективной защиты обеспечивают борированные слои с сочетанием компактной структуры с композиционной при жестких условиях эксплуатации. Условный пересчет результатов изнашивания борированных образцов в жестких условиях позволяет предположить достижение пробега клинового гасителя колебаний в общесетевых условиях более 600 тыс. км.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Курасов, Д. А. Справочник технолога по ремонту электроподвижного транспорта / Д.А. Курасов, В.И. Эльперин. Киев : Техника, 1990. 192 с.
2. Минкевич А.Н. Применение борирования для повышения стойкости быстроизнашиваемых деталей подвижного состава / А.Н. Минкевич, М.Г. Крукович, Е.А. Колмыкова, А.Д. Шуринов, В.Х. Сорокина // Межвузовский сб. научн. трудов / Повышение работоспособности деталей и сварных узлов подвижного состава железнодорожного транспорта. М.: Изд. МИИТа, 1986, вып. 783, С. 27-32.
3. Крукович, М. Г. Пути повышения работоспособности изнашиваемых деталей подвижного состава / М. Г. Крукович, Г. А. Казакевич // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2023. № 38. С. 46-49.
4. Крукович, М. Г. Пути оптимизации износостойкости наплавленных слоев / М. Г. Крукович, А. Д. Федотова, Г. А. Казакевич // Национальная Ассо-

циация Ученых. 2021. № 66-1(66). С. 34-39. – DOI 10.31618/nas.2413-5291.2021.1.66.404.

5. Крукович, М. Г. Пластичность борированных слоев / М. Г. Крукович, Б. А. Прусаков, И. Г. Сизов. Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2010. 383с. ISBN 978-5-9221-1240-6.
6. Федин, В. М. Обоснование применения в качестве конструкционного материала чугуна или стали для фрикционных клиньев тележки грузового вагона / В. М. Федин, А. И. Борц // Новые технологии производства деталей с увеличенными сроками эксплуатационного содержания для железнодорожного транспорта : К 120-летию Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ) / Российская Академия Наук МГУПС (МИИТ). Москва : Всероссийский институт научной и технической информации РАН, 2016. С. 100-105.

7. Борщ, Б. В. Повышение долговечности фрикционного клинового гасителя колебаний тележек грузовых вагонов: специальность 05.02.01 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Борщ Борис Васильевич. Москва, 2009. 27 с.

8. Клинь фрикционный из высокопрочного чугуна для тележек грузовых вагонов / Технические условия ТУ 3183-163-01124323-2003.  
9. Клинь фрикционный из серого чугуна для тележек грузовых вагонов / Технические условия ТУ 3163-234-01124323-2007.

## REFERENCES

1. Kurasov DA, Elperin VI. Handbook of technologist for repair of electric mobile transport. Kiev: Technika; 1990.  
2. Minkevich AN, Krukovich MG, Kolmykova EA, Shurinov ASD, Sorokina VH. Use of boration to increase the durability of wear-resistant parts of rolling stock. Interuniversity Collection of Scientific Papers: Improving the Performance of Parts and Welded Assemblies of Railway Rolling Stock. Moscow: Publishing House of MIITa; 1986.  
3. Krukovich MG, Kazakevich GA. Ways to increase the working capacity of wearable parts of rolling stock. *New Materials and Technologies in Mechanical Engineering*. 2023;38:46-49.  
4. Krukovich MG, Fedotova AD, Kazakevich GA. Ways to optimize the wear resistance of built-up layers. *National Association of Scientists*. 2021;66-1(66):34-39. DOI 10.31618/nas.2413-5291.2021.1.66.404.

5. Krukovich MG, Prusakov BA, Sizov IG. Plasticity of borated layers. Moscow : FIZMATLIT; 2010.  
6. Fedin VM, Borts AI. Substantiation of the use of cast iron or steel as a structural material for friction wedges of a freight car truck. *New Technologies for the Production of Parts with Extended Service Life for Railway Transport*. Moscow: All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences; 2016.  
7. Borshch BV. Increasing the durability of the friction wedge damper for vibrations of freight car trucks [abstract of dissertation]. [Moscow (RF)]; 2009.  
8. Friction wedge made of high-strength iron for freight car trucks. Specification TU 3183-163-01124323-2003.  
9. Friction wedge made of gray cast iron for freight car trucks. Specification TU 3163-234-01124323-2007.

## Информация об авторах:

**Крукевич Марат Григорьевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонт подвижного состава» РУТ (МИИТ), тел. +7(495)274-02-74 доб.3348.

**Казакевич Григорий Алексеевич** – аспирант кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонт подвижного состава» РУТ (МИИТ) тел. +7(495)274-02-74 доб.3348.

**Krukovich Marat Grigorievich** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology of Transport Engineering and Repair of Rolling Stock at RUT (MIIT); phone: +7(495)274-02-74 extension number 3348.

**Kazakevich Grigory Alekseevich** – Postgraduate Student of the Department of Technology of Transport Engineering and Repair of Rolling Stock at RUT (MIIT); phone: +7(495)274-02-74 extension number 3348.

**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 05.06.2024; одобрена после рецензирования 24.06.2024; принята к публикации 26.06.2024. 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 05.06.2024; approved after review on 24.06.2024; accepted for publication on 26.06.2024. 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*.