Машиностроение и машиноведение

УДК 625.144.5 + 06

Влияние инновационного многослойного ионно-плазменного покрытия CrAlSiN/Cr на износостойкость многодисковой фрикционной муфты путевой машины в северных условиях эксплуатации*

В.И. Колесников, О.И. Коваленко, К.Н. Политыко, В.В. Шаповалов, И.В. Колесников, И.А. Колодяжный

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»

Effect of an innovative multilayer ion-plasma CrAlSiN/Cr coating on the wear resistance of a multi-disc friction clutch in a track maintenance machine under northern operating conditions

V.I. Kolesnikov, O.I. Kovalenko, K.N. Polityko, V.V. Shapovalov, I.V. Kolesnikov, I.A. Kolodyazhny

Rostov State Transport University

Рассмотрена необходимость повышения надежности и долговечности соединительных муфт, применяемых в путевых машинах — погрузочно-транспортных грузовых мотовозах МПТГ-3 и роторных снегоочистителях «Ураган», эксплуатируемых в условиях критически низких температур северных регионов нашей страны. Применение ранее устанавливаемых зарубежных упругих муфт с эластичными элементами является неактуальным ввиду их плохой адаптации к работе в регионах Крайнего севера, где температура может опускаться до –60 °С. В таких условиях их эффективность снижается, а резинотехнические компоненты преждевременно выходят из строя, что может привести к сбоям в работе путевой машины. В качестве замены зарубежной эластичной муфте разработана перспективная отечественная многодисковая фрикционная муфта с двумя каскадами усиления. Для повышения ресурса ее первого каскада предложено использовать вакуумное многослойное покрытие CrAlSiN/Cr во фрикционном контакте между нагружаемыми элементами с фрикционными поверхностями и телами качения сферической формы. Предлагаемое покрытие получено вакуумно-дуговым методом осаждения на стальных подложках 40ХН. Показано, что оно обладает высокой твердостью и благоприятным сочетание индексов упругости H/E и пла-

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-30007-П, https://rscf.ru/project/21-79-30007/ в Ростовском государственном университете путей сообщения.

стичности H^3/E^2 с низкой интенсивностью износа при комнатной и отрицательной температурах.

EDN: LYDOPL, https://elibrary/lydopl

Ключевые слова: многослойное покрытие CrAlSiN/Cr, соединительная муфта, фрикционный элемент, трибологические испытания, износостойкость муфты, путевые машины

The relevance of the research presented in this publication is driven by the need to improve the reliability and durability of advanced domestic coupling systems used in track maintenance machines, such as loading and transport motor vehicles (MPTG, modification 3) and rotary snowplows “Uragan”. The aforementioned machines operate under extremely low temperatures typical of northern regions of the Russian Federation.The key issue lies in the fact that previously used imported flexible couplings, which incorporate elastomeric elements, are poorly adapted for operation in Arctic conditions, where temperatures can drop to −60 °C. The use of such uncontrolled elastic couplings leads to reduced performance efficiency and premature failure of rubber components, which may result in operational disruptions of track maintenance equipment. As an alternative to foreign elastic couplings, a promising domestic multi-disc coupling with a two-stage amplification system is proposed. In order to enhance the service life of the first amplification stage of this multi-disc friction coupling, the application of a vacuum multilayer CrAlSiN/Cr coating is suggested for the frictional contact between load-bearing elements with friction surfaces and spherical rolling bodies. The coating was deposited on 40KhN steel substrates using vacuum arc deposition. It is demonstrated that the coating exhibits high hardness, favorable H/E and H^3/E^2 ratios, and low wear intensity under both room and subzero temperature conditions.

EDN: LYDOPL, https://elibrary/lydopl

Keywords: multilayer coating CrAlSiN/Cr, coupling, friction element, tribological tests, coupling wear resistance, track maintenance machines

Соединительные муфты (СМ) — важные элементы технических систем, обеспечивающие передачу крутящего момента между валами и компенсацию их взаимных смещений. По типу привода различают механические, гидравлические, пневматические и электромагнитные СМ, каждая из которых имеет отличительные особенности конструкции и эксплуатации [1].

Механические СМ обеспечивают быстрое и надежное соединение, но требуют ручного управления и в некоторых случаях значительных усилий для включения. Они реализуют передачу момента путем непосредственного контакта рабочих элементов, таких как зубчатые, кулачковые или фрикционные пары. Основными достоинствами механических СМ являются простота конструкции, высокая надежность и отсутствие необходимости во внешнем источнике энергии, однако они характеризуются ограниченной возможностью регулирования и повышенным износом контактных поверхностей.

Гидравлические СМ позволяют управлять соединением с помощью гидросистемы, что обеспечивает более точное и плавное управление техническими устройствами. СМ такого типа функционируют на основе передачи энергии потоком рабочей жидкости, создаваемым вращением насосного колеса и воспринимаемым турбинным колесом. Они обеспечивают плавный пуск, демпфирование ударных нагрузок и защиту механизмов от перегрузок, однако имеют сравнительно низкий коэффициент полезного действия и требуют высокого уровня герметичности гидросистемы, в которой находится рабочая жидкость [1].

Пневматические СМ используют сжатый воздух для создания прижимного усилия между фрикционными элементами. К их достоинствам относятся быстродействие и возможность дистанционного управления, а к недостаткам — зависимость от источника сжатого воздуха и чувствительность к утечкам.

Электромагнитные СМ обеспечивают передачу крутящего момента за счет электромагнитного взаимодействия. Их отличает высокая точность управления, возможность автоматизации и отсутствие механического контакта в ряде конструкций, что снижает износ. Вместе с тем такие муфты требуют источника электроэнергии и обладают более сложной системой

управления. Принцип их работы основан на создании магнитного поля, которое вызывает сцепление или взаимодействие между ведущими и ведомыми элементами.

Выбор типа СМ определяется условиями эксплуатации, требованиями к управляемости, уровню нагрузок и надежности, а также экономическими и технологическими факторами.

Для передачи крутящего момента между силовыми агрегатами часто применяют механические СМ с эластичными элементами, которые позволяют создавать мягкое, но надежное соединение, компенсирующее смещение валов [2–5]. В путевых машинах — мотовозах погрузочно-транспортных грузовых МПТГ-3 и роторных снегоочистителях «Ураган» производства Тихорецкого машиностроительного завода им. В.В. Воровского — применены СМ К-типа немецкого концерна Voith. Они предназначены для работы в таких условиях, когда ведущая и ведомая части узла могут быть не соосны, например, располагаться на разных фундаментах.

СМ Voith технологичны и имеют множество модификаций, которые представлены в заводских каталогах концерна и предназначены для выполнения узкоспециализированных задач. Эти СМ оснащены одним или несколькими эластичными элементами, применение которых способствует увеличению длительности фазы включения подсоединяемого агрегата с целью снижения динамических нагрузок. СМ с эластичными элементами обладают высокой эффективностью, однако имеют такой существенный недостаток, как невозможность применения в северных регионах, где температура воздуха снижается до критических значений (T = –50…–60 °C).

В связи с описанной проблемой использования немецкой муфты для путевых машин МПТГ-3 и роторного снегоочистителя инженеры и ученые Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС) разработали перспективную отечественную СМ взамен зарубежной.

При эксплуатации мотовозов МПТГ-3 и роторных снегоочистителей «Ураган» необходимо обеспечить надежную работу узлов трения при отрицательных температурах за счет постоянной передачи крутящего момента и компенсации возможной несоосности валов СМ.

В разработанной перспективной многодисковой фрикционной СМ объектами активного управления являются фрикционные контакты нагружаемых элементов, имеющих фрикционные поверхности с телами качения сферической формы, выполненными из стали 10 (рис. 1). В этой трибосистеме высокие контактные напряжения совмещены с циклическим трением качения–скольжения. При нарушении геометрических характеристик контактных поверхностей вследствие износа происходит отклонение угла α от расчетных значений, а также значительное снижение ресурса СМ.

В связи с этим на этапе проектирования одно из современных решений — повышение ресурса указанной зоны применением вакуумных многослойных износостойких покрытий MeN/Me с контролируемой архитектурой слоев, которые позволяют формировать стабильные трибологические характеристики в широком диапазоне нагрузок и температур [6, 7].

Наноламинированная структура, чередование высокотвердых и более вязких слоев, а также изменение химического состава по толщине позволяют одновременно повысить твердость, вязкость, сопротивление трещинообразованию и критическую нагрузку разрушения [8–10].

В настоящее время у многослойных нитридных систем TiN/CrN, CrN/Cr_2N, CrTiN/CrCN и их аналогов коэффициент трения и износ меньше, чем у однослойных покрытий вследствие эффективного рассеяния энергии трещин и подавления локальной концентрации напряжений на интерфейсах [11].

В работе [12] показано, что оптимизация архитектурного слоя, например, градиентное рас-

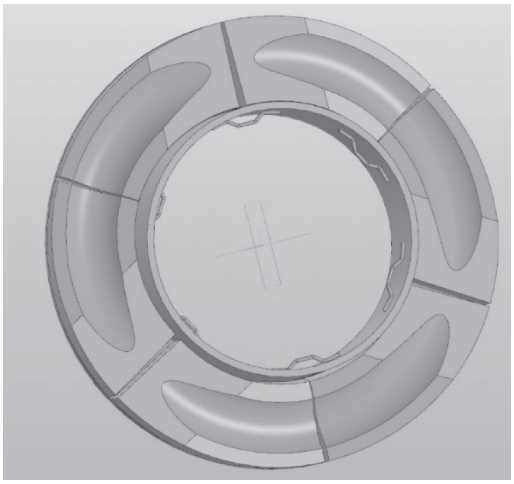


Рис. 1. Модель нагружаемых элементов с фрикционными поверхностями для тел качения сферической формы

пределение Al и Si, а также наличие слоев Cr или CrN позволяет расширить диапазон циклических нагрузок и снизить риск образования внутренних дефектов (межслойное отслаивание, образование трещин).

Следует отметить, что большая часть трибологических исследований многослойных систем MeN/Me выполнена при комнатной и повышенной температурах, которые соответствуют условиям резанья и сухого трения, так как эти покрытия устойчивы к окислению и абразивному износу благодаря сочетанию высокой твердости и низкого коэффициента трения [13, 14]. Тогда как их поведение при отрицательных температурах освящено ограниченно.

Анализ публикаций в базах Scopus и Web of Science показал отсутствие экспериментальных данных трибологических свойств многослойных покрытий MeN/Me и MeN/MeN при температуре до –60 °С. В связи с этим становится актуальной экспериментальная оценка работоспособности многослойной системы MeN/Me по схеме шар — пластина, имитирующая наиболее нагруженную зону фрикционного усилительного звена отечественной СМ при отрицательных температурах.

Цель работы — обоснование применения многослойного износостойкого покрытия MeN/Me для повышения ресурса многодисковой фрикционной СМ, разработанной для путевых машин и роторных снегоочистителей, с экспериментальной оценкой трибологических характеристик при температуре –60 °С.

Анализ конструкции муфты Voith и обоснование параметров разработанной многодисковой фрикционной СМ с электромагнитным управлением. ***СМ концерна Voith.*** Согласно государственной программе импортозамещения, по заказу Тихорецкого машиностроительного завода им. В.В. Воровского, специалистами и учеными РГУПС разработана многодисковая фрикционная СМ взамен СМ концерна Voith.

СМ устанавливают на мотовоз МПТГ-3, предназначенный для технического обслуживания и ремонта как железнодорожных путей, так и высоковольтной контактной сети на электрифицированных участках. В роторном снегоочистителе «Ураган», применяемом для очистки железнодорожных путей от снега и льда, СМ является одним из элементов, связывающих дизельный двигатель с карданным валом.

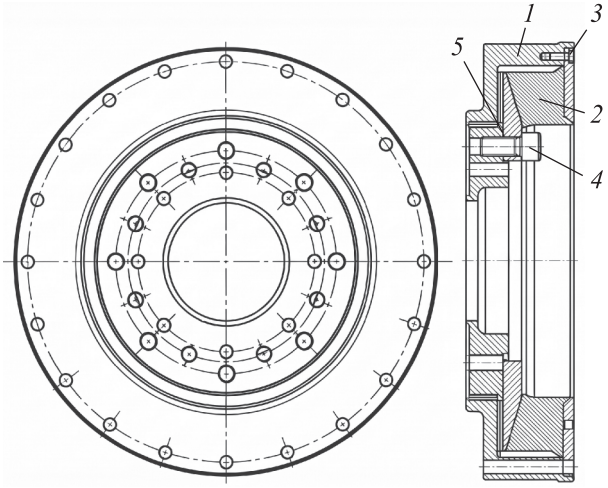


Рис. 2. Схема СМ концерна Voith:
1 — ведомая полумуфта (корпус);
2 — резинотехнический эластомерный элемент;
3 — винт крышки фиксирующий; *4* — крепежный болт;
5 — ведущая полумуфта

В состав СМ концерна Voith (рис. 2) входит корпус *1*, являющийся ведомой полумуфтой, зафиксированной на валу ротора генератора, внутри которой расположен резинотехнический эластомерный элемент *2*, застопоренный ведущей полумуфтой *5*, соединенной с карданным валом. Резинотехнический эластомерный элемент круглой формы выполнен по технологии вулканизации каучука с добавками для реализации податливости и гибкости узла. Благодаря эластичности этот элемент обеспечивает СМ угловую деформацию, радиальные и осевые перекосы до 6°. Подключение соединяемых узлов растянуто во времени, что способствует плавному пуску генераторной установки и минимизации паразитных динамических нагрузок, влияющих на выход из строя подшипников вала ротора генератора, при передаче крутящего момента.

В путевой машине ведущий элемент — соединительная полумуфта *3* (рис. 3) — состыкован с карданным валом *2*, который приводится в движение от коленчатого вала дизельного двигателя ЯМЗ-8502.10-08 *1*, а ведомый элемент находится на валу ротора генератора модели ГС-400-Б1-440 УХЛ2 *4*.

Синхронный генератор ГС-400 необходим для механизмов и узлов, не имеющих силового агрегата, приводящего их в движение. Соединение с помощью СМ позволяет выполнять раздачу энергии потребителям, работать при температуре T =–50…+50 °С и переносить атмосферные осадки в виде дождя и снега.

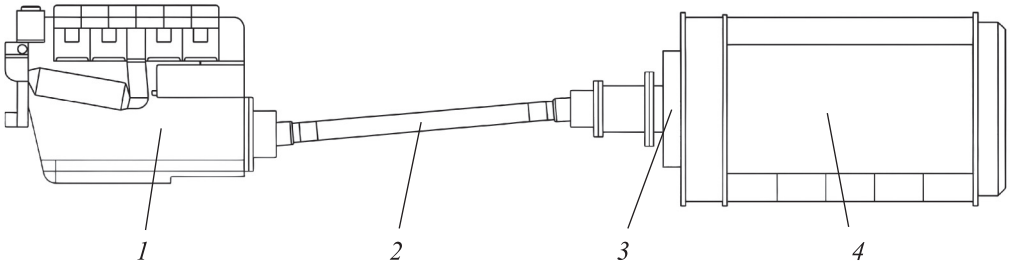


Рис. 3. Схема соединения дизельного двигателя с генератором

Основным недостатком СМ концерна Voith является неполное исключение возможности динамических нагрузок в определенных режимах эксплуатации, например в условиях низких отрицательных температур. Невозможно подобрать оптимальный баланс жесткости упругого элемента для работы СМ в различных климатических условиях и режимах. Муфта является неуправляемой: передаваемый через нее момент нельзя регулировать, невозможно реализовать оптимальное время ее включения. Кроме того, СМ имеет высокую стоимость и требует поставки импортных запасных частей.

Для повышения конкурентоспособности и снижения энергозатрат отечественная СМ основана на используемых и проверенных решениях в виде высоконадежных элементов: роликовых подшипниках, подобранных по государственному стандарту, серийно выпускаемых стальных и металлокерамических фрикционных дисках для гидропередачи УГП-230, шлицевых соединениях. Эти элементы прошли длительное тестирование в ходе эксплуатационных испытаний, апробированы и оптимизированы в различных механизмах. Процесс их изготовления технологически отработан и имеет относительно низкую себестоимость. Все это обеспечивает высокую надежность и низкую стоимость отечественной СМ по сравнению с аналогами, в частности СМ концерна Voith [15, 16].

Описание разработанной фрикционной многодисковой СМ с электромагнитным управлением. Для снижения затрат мощности на работу управляющего электромагнита, габаритных размеров и металлоемкости всего узла разработана перспективная многодисковая СМ с двумя каскадами усиления (рис. 4).

Одной из основных задач при создании отечественного узла для путевых машин являлось снижение динамических нагрузок в СМ, ввиду которых выходят из строя подшипники приводного вала генератора при передаче крутящего момента от ведущих узлов к ведомым. Отечественная многодисковая СМ (см. рис. 4) содержит два основных компонента, которые включаются друг за другом. Конструкция такого типа выбрана на основании технологической модернизации узла с тремя каскадами усиления

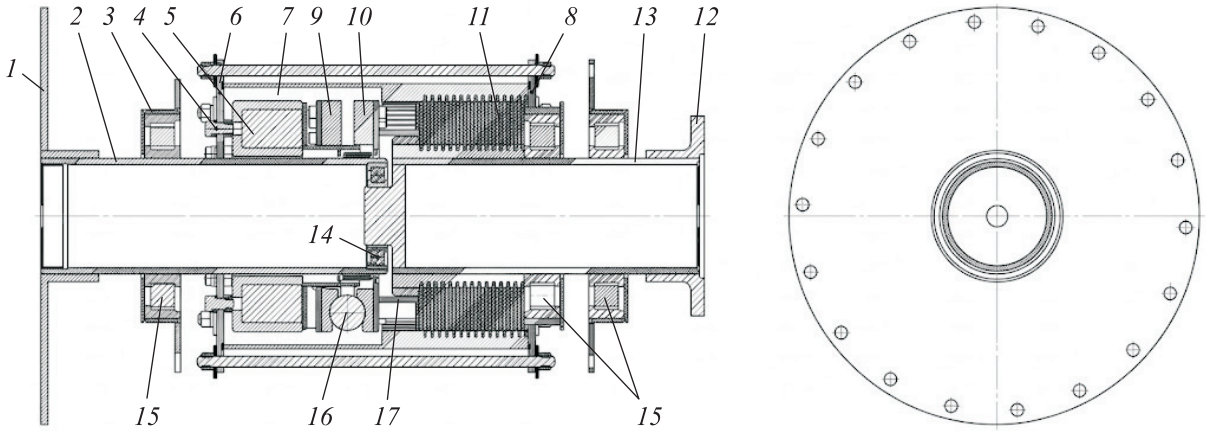


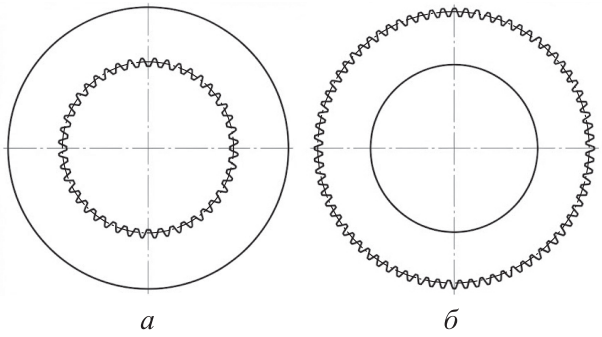
Рис. 4. Схема многодисковой СМ:
1 и *2* — первичные фланец и вал; *3* — промежуточная опора; *4* — крепежный болт; *5* — электромагнит; *6* и *8* — левая и правая ведущие крышки; *7* — картер ведущей полумуфты; *9* и *10* — левый и правый диски нагружения; *11* — многодисковая СМ; *12* и *13* — вторичные фланец и вал; *14*, *15* — подшипники; *16* — тело качения сферического типа; *17* — выжимная нагружающая пластина

[15] с целью уменьшения его размеров и металлоемкости. Несколько элементов необходимы для уменьшения мощностных затрат на работу электромагнита, регулирующего (активирующего) управление СМ [15]. Эффективность предлагаемой СМ обусловлена использованием динамической анизотропии фрикционных связей [15, 16].

Первый компонент усиления оснащен левым *9* и правым *10* дисками нагружения, между которыми расположены тела качения сферического типа. Выжимная нагружающая пластина *17* прикреплена к правому диску. Второй усилительный компонент — многодисковая СМ *11* — находится в закрытом картере в масляной среде. Напряжение, подаваемое на электромагнит *5*, позволяет включать эту СМ.

В состав многодисковой СМ входит пакет ведущих дисков из стали 65Г и ведомых, выполненных на железной основе из стали 20 с нанесенным сверху металлокерамическим покрытием специальной металлокерамикой МК5 (рис. 5, *а* и *б*). Согласно данным справочной литературы [17], полученным экспериментальным путем, коэффициент трения для металлокерамических дисков находится в пределах 0,12…0,15. Изменение коэффициента трения в рамках этого небольшого диапазона оказывает значительное влияние на коэффициент усиления двухкомпонентного модуля.

При отсутствии питания у электромагнита крутящий момент от дизельного двигателя ЯМЗ-8502.10-08 передается на компоненты ведущей полумуфты: первичные фланец *1* и полый в сечении вал *2*, ведущие левую *6* и правую *8* крышки, а также на картер ведущей полумуфты *7*. Они вращаются с одинаковой частотой коленчатого вала дизельного двигателя. В состав многодисковой СМ входят ведущие и ведомые диски. Первые закреплены на картере ведущей полумуфты, вторые имеют зацепление с вторичным валом *13*. В этом случае ведомая полумуфта и ее составляющие — вторичные фланец *12* и вал *13*, левый и правый диски нагружения, — а также ведомые диски многодисковой СМ статичны.



а *б*

Рис. 5. Схемы ведущего (*а*) и ведомого дисков (*б*) многодисковой СМ

При подаче напряжения на электромагнит происходит его соединение с левым диском нагружения, который начинает вращаться относительно правого диска нагружения. Вследствие их относительного вращения осуществляется сдвиг (смещение) правого диска нагружения относительно оси вращения вправо и включение многодисковой СМ. После достижения необходимого усилия прижатия между фрикционными элементами многодисковой СМ начинают вращаться вторичные вал и фланец.

Принцип действия первого компонента (каскада) усиления многодисковой СМ можно представить схематично, как показано на рис. 6. Необходимый угол наклона α определяется из условия

$$F_{ск} \geq F_{тр1}, \qquad (1)$$

где $F_{ск}$ — скатывающая сила, действующая на тело качения сферического типа; $F_{тр1}$ — сила трения между этим телом и нагружаемыми левым и правым дисками усилительного звена.

Выражение (1) можно представить как

$$N \sin\alpha \geq N f_1 \cos\alpha; \qquad (2)$$

$$\operatorname{tg}\alpha \geq f_1,$$

где N — нормальная нагрузка; f_1 — коэффициент трения между сферическим телом качения и дисками.

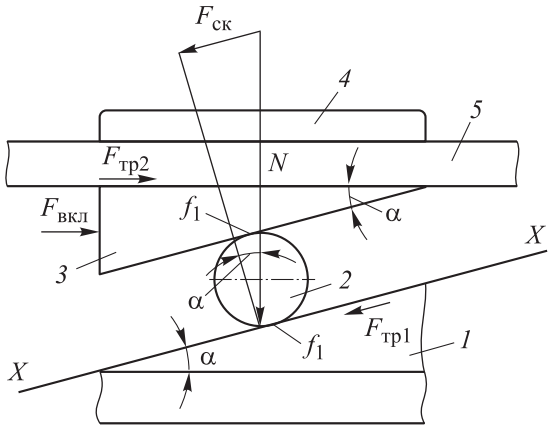


Рис. 6. Схема фрикционного усилительного звена: *1* и *3* — ведомый и ведущий элементы; *2* — тело качения сферической формы; *4* — электромагнит; *5* — корпус

Для обеспечения условия (2) разработана специальная технология получения геометрических параметров нагружаемых сегментов, изложенная ниже.

Неуправляемое включение СМ является невозможным благодаря исключению самозаклинивания частей усилительного компонента (звена) из условия (2).

При соблюдении условии (2) СМ отключена. Для ее включения необходимо активировать электромагнит *4* (см. рис. 6) так, чтобы выполнялось условие

$$F_{тр2} + F_{вкл} > F_{ск} \text{ при } \Delta f \to 0, \qquad (4)$$

где $F_{тр2}$ — сила трения между ведущим элементом *3* и корпусом *5*; $F_{вкл}$ — сила, необходимая для включения электромагнита *4*; Δf — величина изменения коэффициента трения.

При одинаковых значениях угла наклона рабочих поверхностей левого и правого дисков первого каскада (см. рис. 4) относительно друг друга и коэффициента трения между сферическим телом качения и каждым из этих дисков ($f_1 \approx 0{,}001\ldots0{,}005$) можно принять, что $f_1 \approx 0$ и учитывать это в дальнейших расчетах и оптимизации конкретных фрикционных систем, а также при $F_{тр2} < F_{ск}$. Если $\Delta f_2 \to 0$, то для этого фрикционного узла можно реализовать условие $k_{ус} \to \infty$, где $k_{ус}$ — коэффициент усиления. На основании изложенного реализовано условие включения фрикционной системы, находящейся в неустойчивом равновесии, с минимальными затратами мощности.

Таким образом, практическое значение коэффициента усиления зависит от диапазона изменения коэффициента трения f_2, а основным условием реализации $k_{ус} \to \infty$ является соотношение $\Delta f_2 = 0$. Эти условия можно реализовать, используя последние разработки ведущих отечественных трибологов в области вакуумных ионно-плазменных покрытий И.В. Колесникова, Д.С. Мантурова и Е.С. Новикова.

Процессы, связанные с контактированием между фрикционными поверхностями, сложно и нелинейно коррелируются (взаимосвязаны и взаимозависимы) более чем с 40 различными факторами. В зависимости от этого диапазон коэффициента трения изменяется от 0 до ∞ [15, 18, 19]. Таким образом, для обеспечения эффективности и надежности эксплуатации фрикционной системы фрикционные усилительные звенья имеют возможность регулирования и управления коэффициентом трения и его стабилизацией. Так как работа фрикционно-усилительных звеньев невозможна без привода включения, допускается его размещение непосредственно в корпусе СМ.

В первом компоненте усиления применены тела качения сферической формы (шарики) *16*, которые находятся во фрикционном контакте с рабочими поверхностями левого и правого дисков (см. рис. 4). Согласно теории вероятности, геометрические характеристики тел качения сферической формы распределены по закону Гаусса. В начальный период работы реализуются три точки контакта — максимальная и две наиболее близкие к ней.

Износ нагружаемых профилей левого и правого дисков первого компонента (каскада) приводит к нарушению их геометрических характеристик и возникновению условий, снижающих надежность СМ, т. е. к отклонению угла α (см. рис. 6) от математически точных значений. Для достижения надежной и эффективной работы первого каскада — фрикционного усилительного звена — применен трехточечный контакт, который обеспечивает стабильно-устойчивое опирание системы, равномерное нагружение тел качения и передачу одинакового усилия прижатия на пакет дисков многодисковой СМ. С учетом того, что в конструкции СМ имеются три нагружаемых сегмента как на левом диске, так и на правом, необходимо соблюсти идентичность геометрических характеристик этих сегментов, в частности угла наклона α, точность которого должна быть прецизионной.

Чтобы получить гарантированные значения расчетных параметров, нагружаемые сегменты выполняют по специальной технологии, которая заключается в следующем. Изготавливают левый и правый диски усилительного компонента с заданными размерами, после чего на токарном станке нарезают нагружаемую поверхность в виде фрагмента тора, диаметр которого на 2…3 % больше, чем у нагружаемых сферических элементов. Затем задние торцевые поверхности дисков шлифуют на высокоточном фрезерном станке с целью обеспечения строгой параллельности обрабатываемых поверхностей. Далее просверливают шесть монтажных отверстий, после чего фрезеруют заданный угол сегментов, выполняя эту операцию за один проход. В завершение в дисках сверлят отверстия под стопорные элементы.

Для обеспечения высокой износостойкости нагружаемых поверхностей дисков и сферического тела качения рассмотрим применение многослойного покрытия CrAlSiN/Cr, повышающего ресурс СМ в целом и ее элементов при комнатной и отрицательной температурах.

Материалы и методы исследования покрытия. Нанесение экспериментальных металлокерамических композиционных покрытий CrAlSiN/Cr выполняли катодно-дуговым методом с помощью катодов Cr и Al-Si в вакуумной камере BRV600. В качестве подложки использовали сталь 40ХН, выбор которой обусловлен тем, что для анализа структуры, механических и трибололологических свойств покрытия определяющими являются характеристики самого покрытия. Сталь 10 и 40ХН обладают близкими значениями модуля упругости и температурного коэффициента линейного расширения. Так как твердость сталей значительно ниже, чем у покрытия CrAlSiN/Cr, это различие почти не влияет на формирование покрытия и механизмы его изнашивания в условиях испытания. У этих покрытий значения температурного коэффициента линейного расширения соседних металлических и керамических слоев различаются незначительно. Причем металлические слои Cr, в отличие от керамических CrAlSiN, обладают высокой пластичностью, что способствует релаксационным процессам.

Реализацию многослойной системы осуществляли по схеме Cr (подслой) + CrAlSiN + + Cr + CrAlSiN + Cr… с общим количеством слоев 12 и завершающим слоем CrAlSiN на поверхности. Для увеличения адгезии между подложкой из стали 40ХН и нитридным слоем катодно-дуговым методом наносили подслой Cr в течение 1 ч. Нитридный слой CrAlSiN осаждали в среде с 11%-ным содержанием азота и 6%-ным содержанием аргона в течение 45 мин, а металлический слой Cr — в среде с 7%-ным содержанием аргона в течение 1 ч.

Архитектуру покрытий CrAlSiN/Cr регулировали временем напыления каждого слоя, определяющим их толщину. Целевым направлением при получении многослойного покрытия являлось формирование заданного элементного состава слоев CrAlSiN в композиционном покрытии, имеющем следующий состав, % ат.: Cr — ~25; Al — ~25; Si — 4…8; N — ~45…50.

Исследование морфологических характеристик поверхности и микроструктуры поперечных сечений покрытий проводили методом растровой электронной микроскопии с помощью двулучевого сканирующего электронного микроскопа ZEISS Crossbeam 340. Для определения элементного состава использовали энергодисперсионный рентгеновский детектор X-Ma 50N компании Oxford Instruments, которым оснащен этот электронный микроскоп.

Физико-механические свойства исследовали на измерительной платформе Nanotest 600 в наномасштабе методом непрерывного индентирования [20]. Применение трехгранной пирамиды Берковича для наноиндентирования при глубине отпечатка не более 0,2 мкм позволило исключить влияние подложки, так как общая толщина покрытия составила 1,3 мкм.

Измерения проводили согласно ГОСТ Р 8.748–2011 [21] в трех произвольно выбранных областях покрытия с равномерным распределением инденторов внутри зоны. В каждой зоне выполняли не менее десяти измерений, причем отпечатки, попавшие на поверхностные дефекты или неровности поверхности, исключали из статистической обработки. Найдены средние значения с учетом рекомендаций ГОСТ Р 50779.25–2005 и ГОСТ Р ИСО 16269-4–2017 [22, 23]. На основе анализа кривых нагрузка — разгрузка методом Оливера — Фарра рассчитывали твердость H, модуль упругости E, индексы упругости H/E и пластичности H^3/E^2.

Трибологические характеристики покрытий оценивали методом вращательного трения по схеме шар — пластина (см. рис. 2) в условиях сухого трения на трибометре TRB (Anton Paar Tritec) в соответствии со стандартами DIN 50324 и ASTM G99 [24, 25]. Испытания проводили при вращательном движении по окружности образца с покрытием относительно неподвижного контртела диаметром 6 мм из оксида алюминия. Количество циклов — 50 000, нормальная нагрузка N — 10 Н. Профиль лунки износа определяли с помощью оптического профилометра Zygo NewView 600.

В качестве трибологических параметров выступали коэффициент трения μ и интенсивность изнашивания образца

$$I = \frac{V}{NL},\ \text{мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м}),$$

где V — объем изношенного материала; L — пройденный индентором путь, м.

Для оценки трибологических характеристик образцов при низких и высоких температурах использовали метод испытания по схеме шар — диск на разработанном трибометре [26]. Температура в зоне контакта $T = -60 \pm 5$ °C. Пластины из стали с покрытием закрепляли в тисках, в качестве контртела выступал шарик из оксида алюминия диаметром 6 мм, нагрузка на контртело составляла 10 Н. Относительная скорость скольжения $v = 1$ мм/с при амплитуде перемещения 5 мм; вертикальная нагрузка $N =$ = 10 Н, общее расстояние скольжения — 1,8 м.

Исследование многослойного покрытия CrAlSiN/Cr. Результаты исследования многослойных композиционных металлокерамических покрытий CrAlSiN/Cr приведены на рис. 7, *а–е* где показаны типовые варианты структуры многослойного покрытия CrAlSiN/Cr, в том числе относительно тонкое покрытие с соизмеримыми по толщине металлокерамическими слоями (см. рис. 7, *а*, *б*) и типичный вид поверхности покрытия системы CrAlSiN/Cr (см. рис. 7, *д*).

Анализ микроснимков показывает, что полученные покрытия обладают однородной бездефектной структурой с плотным прилеганием слоев друг к другу и подложке, что косвенно может указывать на высокий уровень адгезии системы покрытие — подложка. На поверхности покрытий имеется капельная фаза хрома (см. рис. 7, *в* и *е*), однако размеры капель незначительны и распределены на расстояниях, значительно превышающих их размеры (см. рис. 7, *в*).

Аналогичная поверхность часто наблюдается у вакуумных ионно-плазменных покрытий при отсутствии или недостаточной эффективности магнитной сепарации [27]. Подобное распределение капельной фазы не оказывает влияния на трибологические характеристики покрытий при испытаниях на трение скольжения. При механических испытаниях по методу непрерывного индентирования влияние капельной фазы сказывается только на некоторых статистических показателях, не оказывая воздействия на усредненные значения твердости H и модуля упругости E покрытия.

Многослойные покрытия CrAlSiN/Cr имели физико-механические свойства, приведенные в табл. 1.

Полученные физико-механические свойства многослойного покрытия CrAlSiN/Cr соответствуют уровню износостойких нитридных покрытий, которые авторы работ [11, 12, 14, 28–31] связывают с высокой эксплуатационной стойкостью. Значения параметров, указанные в табл. 1, включая $H/E_r = 0{,}101$, сопоставимы с диапазоном $H/E = 0{,}07\ldots0{,}12$ для покрытий TiAlSiN и TiAlSiCN, рассматриваемых как оптимальные с точки зрения твердости и модуля упругости [28]. Индекс упругости H/E характеризует склонность покрытий к хрупкому разрушению. В работах [12, 14, 28–31] показано, что он коррелирует с интенсивностью изнашивания, а более высокое значение H/E способствует с повышенной стойкостью к абразивному изнашиванию многокомпонентных нитридных покрытий.

Индекс пластичности $H^3/E_r^2 = 0{,}341$ также соответствует диапазону, который отмечен повышением вязкости разрушения и устойчивости к износу для керамических покрытий CrAlSiN [12, 14, 29], однослойных систем TiN, CrN [32] и многослойных CrN и ZrN [30]. Таким образом, полученные физико-механические свойства покрытия CrAlSiN/Cr позволяют ожидать, что многослойная архитектура будет эффективно сопротивляться образованию трещин и распределять пластическую деформацию при контактном нагружении.

В течение всего цикла трибологических испытаний фиксировали изменения коэффициента μ в зависимости от пройденного пути L. После испытаний исследовали морфологические характеристики поверхности на профилометре NewView 600s для оценки износа нанесенного слоя. Результаты трибологических испытаний покрытия CrAlSiN/Cr при комнатной температуре ($T = +25$ °C) и $T = -60$ °C приведены на рис. 8.

Исследование трибологических характеристик позволило установить, что многослойное покрытие CrAlSiN/Cr обладает низким и стабильным коэффициентом трения при комнатной и отрицательной температурах. При температуре $T = +25$ °C наблюдается монотонное возрастание коэффициента трения от 0,14 до 0,25 (рис. 8, *а*). Анализ структуры дорожки трения (рис. 8, *б*) не выявил явных следов износа, поверхностных дефектов и потери объема материала покрытия в заданном режиме испытания. Это обусловлено сочетанием высокой твердости и низкой упругопластической деформации керамического слоя CrAlSiN с образованием устойчивых защитных три-

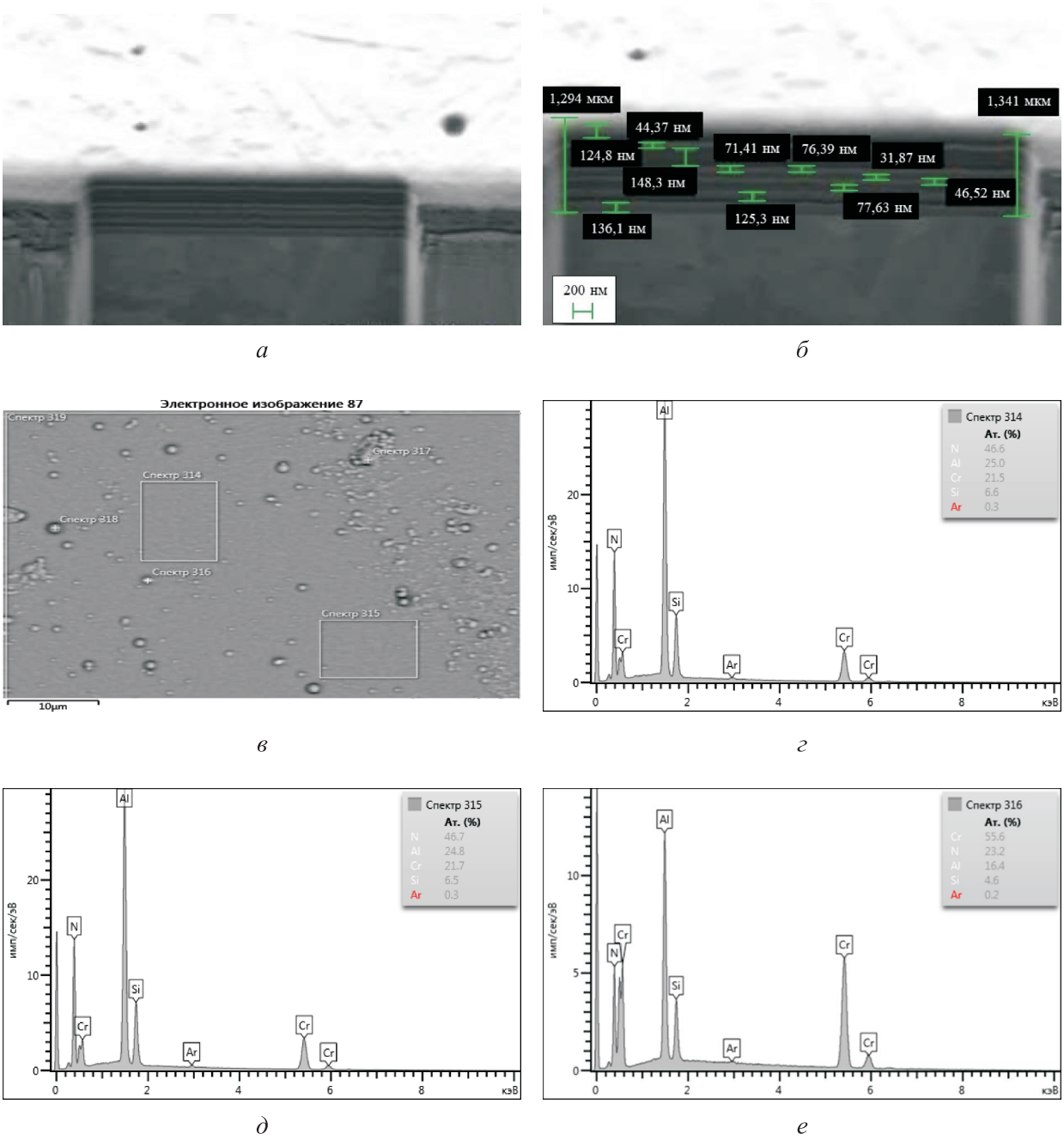


Рис. 7. Результаты исследования многослойных композиционных металлокерамических покрытий CrAlSiN/Cr:
а, б — структуры тонкого (1,13 мкм) покрытия с соизмеримыми по толщине металлокерамическими слоями;
в — электронное изображение с областями сканирования;
г и *д* — распределение элементов в зонах покрытия (Спектр 314) и (Спектр 315);
е — распределение элементов в зоне капельной фазы (Спектр 316)

бослоев как третьего тела, что ранее связывали с повышенной износостойкостью системы CrAlSiN [11, 14, 30].

При температуре T = –60 °С коэффициент трения остается стабильным в течение всего исследования с установившимся режимом трения. На пути трения L = 1,2 м (рис. 8, *в*) наблюдается всплеск кривой, после чего коэффициент трения μ стабилизируется с небольшим увеличением колебаний. Такой пик можно связать с прохождением контртела через поверхностный дефект и завершением стадии приработки с переходом к устойчивому режиму трения с микроскопическим изнашиванием. Поверхность покрытия после испытания (рис. 8, *г*) представляет собой полированную

Таблица 1

Физико-механические свойства многослойного покрытия CrAlSiN/Cr с различной толщиной

Параметр	Значение
Микротвердость H, ГПа	31,56 ± 5,55
Приведенный модуль упругости E_r, ГПа	310,84 ± 19,99
Индекс упругости H/E_r	0,101 ± 0,015
Индекс пластичности H^3/E_r^2	0,341 ± 0,119

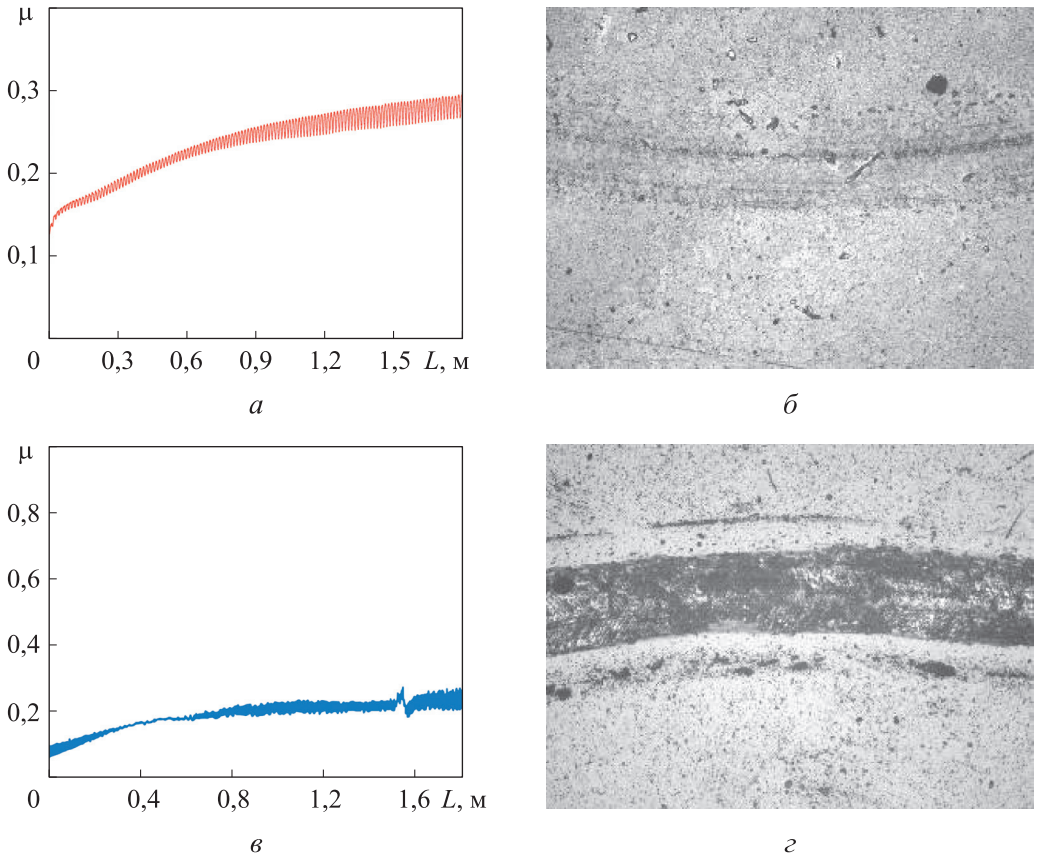


Рис. 8. Результаты трибологических испытаний покрытия CrAlSiN/Cr при температуре T = +25 (*а*, *б*) и –60 °С (*в*, *г*):
а и *в* — зависимости коэффициента трения μ от пройденного пути L;
б и *г* — структуры поверхности покрытия CrAlSiN/Cr до и после испытания

центральную часть дорожки трения без глубоких кратеров и масштабного выкрашивания.

Результаты трибологических испытаний приведены в табл. 2. Расчетная интенсивность изнашивания составила $4{,}95 \cdot 10^{-6}$ мм^3/(м·Н), что соответствует крайне малому износу.

Появление небольшого износа при температуре T = –60 °С связано со снижением пластической релаксации контактных напряжений и ростом хрупкости покрытия при отрицательной температуре. Важным фактором, обеспечившим отсутствие износа при комнатной температуре и минимальный износ при T = –60 °С, является многослойная структура покрытия и наличие промежуточных металлических слоев Cr. Чередование металлических слоев с керамическими формирует систему внутренних барьеров, локализующих деформацию и препятствующих трещинообразованию. Полученные значения коэффициента трения являются типичными для многослойных наноструктурированных нитридных покрытий с высокими показателями твердости и износостойкости [6, 9, 14, 29, 33].

Таблица 2

Результаты трибологических испытаний многослойного покрытия CrAlSiN/Cr

Температура, °С	Коэффициент трения μ	Интенсивность изнашивания I, мм³/(м·Н)
25	0,25	–
–60	0,22	$4{,}95 \cdot 10^{-6}$

Таким образом, при комнатной температуре признаков износа покрытия CrAlSiN/Cr не выявлено, а при температуре T = –60 °С интенсивность изнашивания составила I = $= 4{,}95 \cdot 10^{-6}$ мм³/(м·Н). Для сравнения, в работах [32, 34] интенсивность изнашивания сухого трения при комнатной температуре углеродистых и легированных конструкционных сталей, аналогичных стали 10 и 40ХН, находится на уровне 10^{-5} мм³/(м·Н). Эти результаты свидетельствуют о том, что применение многослойного покрытия CrAlSiN/Cr позволит значительно снизить износ рабочих поверхностей узла трения из стали 10 по сравнению с их состоянием без прикрытия.

Выводы

1. Ввиду отсутствия возможности подбора оптимального баланса жесткости упругого элемента для работы СМ немецкого производства в различных условиях этот продукт менее актуален для использования в легкорельсовом транспорте России. По сравнению с высокоэластичной СМ концерна Voith отечественная управляемая электромагнитная многодисковая СМ имеет такие преимущества, как регулирование передаваемого крутящего момента и реализация оптимального времени включения подсоединяемого узла, что позволяет снизить возможные динамические нагрузки и обеспечить высокую надежность. Их снижение достигается обеспечением предельно минимального времени пуска, что уменьшает ускорение, необходимое для разгона неподвижных масс. Внедрение двух исполнительных компонентов в конструкцию СМ позволило разработать компактный узел с приводом электромагнитного типа с высокой энергоэффективностью.

2. Для повышения долговечности и износостойкости как СМ в целом, так и ее компонентов (нагружаемых поверхностей дисков первого каскада усиления и сферических тел качения) предложено использовать многослойное покрытие CrAlSiN/Cr. Установлено, что после его нанесения образуется однородная структура покрытия с повышенными значениями твердости и модуля упругости, характерными для нитридных покрытий. Трибологические испытания при комнатной температуре не выявили признаков износа, при температуре –60 °С интенсивность изнашивания составила $4{,}95 \cdot 10^{-6}$ мм³/(м·Н), что значительно меньше, чем у углеродистых и легированных конструкционных, аналогичных 10 и 40ХН при комнатной температуре. Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование покрытия CrAlSiN/Cr позволит значительно снизить износ и увеличить ресурс элементов СМ при комнатной и отрицательной температурах.

Литература

[1] Поляков В.С., ред. *Справочник по муфтам*. Ленинград, Машиностроение, 1979. 343 с.

[2] *Highly flexible couplings*. voith.com: веб-сайт. URL: https://voith.com/corp-en/highly-flexible-couplings.html (дата обращения: 05.01.2026).

[3] Hristov H., Tenev S., Mehmedov I. A study of the dynamic stiffness of flexible couplings with a rubber–metal element type SEGME. *Eng. Proc.*, 2024, vol. 60, no. 1, art. 26, doi: https://doi.org/10.3390/engproc2024060026

[4] Озябкин А.Л., Санамян Г.В. Диагностика фрикционно-механической системы шлицевого соединения трансмиссии. *Сборка в машиностроении, приборостроении. Инновационное машиностроение*, 2025, № 7, с. 306–310.

[5] Шаповалов В.В., Сладковски А., Эркенов А.Ч. Актуальные задачи современной триботехники и пути их решения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 1, с. 64–75, doi: http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2015-1-64-75

[6] Fan Q., Zhang S., Lin J. et al. Microstructure, mechanical and tribological properties of gradient CrAlSiN coatings deposited by magnetron sputtering and arc ion plating technology. *Thin Solid Films*, 2022, vol. 760, art. 139490, doi: https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139490

[7] Tritremmel C., Daniel R., Lechthaler M. et al. Influence of Al and Si content on structure and mechanical properties of arc evaporated Al–Cr–Si–N thin films. *Thin Solid Films*, 2013, vol. 534, pp. 403–409, doi: https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.03.017

[8] Yuan Z., Han Y., Zang S. et al. Analysis of the mechanical properties of TiN/Ti multilayer coatings using indentation under a broad load range. *Ceram. Int.*, 2021, vol. 47, no. 8, pp. 10796–10808, doi: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.196

[9] Kovalev A.I., Vakhrushev V.O., Beake B.D. et al. Damage accumulation phenomena in multilayer (TiAlCrSiY)N/(TiAlCr)N, monolayer (TiAlCrSiY)N coatings and silicon upon deformation by cyclic nanoindentation. *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, no. 8, art. 1312, doi: https://doi.org/10.3390/nano12081312

[10] Sui X., Li G., Jiang C. et al. Improved toughness of layered architecture TiAlN/CrN coatings for titanium high speed cutting. *Ceram. Int.*, 2018, vol. 44, no. 5, pp. 5629–5635, doi: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.210

[11] Pogrebnjak A.D., Kravchenko Y.O., Bondar O.V. et al. Structural features and tribological properties of multilayer coatings based on refractory metals. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 240–258, doi: https://doi.org/10.1134/S2070205118020107

[12] Teles V.C., de Mello J.D.B., da Silva W.M. Abrasive wear of multilayered/gradient CrAlSiN PVD coatings: effect of interface roughness and of superficial flaws. *Wear*, 2017, vol. 376–377, part B, pp. 1691–1701, doi: https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.116

[13] Bobzin K., Brögelmann T., Kruppe N.C., Carlet M. Investigation on the incorporation of oxygen and thermal stability of HPPMS TiAlCrSiON nanolayer coatings," *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 418, p. 127231, doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.127231

[14] Kolesnikov V.I., Kudryakov O.V., Varavka V.N. et al. Structural-phase state and properties of Cr-Al-Si-N coatings obtained by vacuum arc plasma deposition. *Phys. Mesomech.*, 2023, vol. 26, no. 2, pp. 126–136, doi: https://doi.org/10.1134/S1029959923020029

[15] Шаповалов В.В., Саямова Т.Л., Горин С.Л. и др. Разработка фрикционной многодисковой соединительной муфты для передвижных электростанций. *Вестник РГУПС*, 2024, № 4, с. 60–69, doi: https://doi.org/10.46973/0201–727X_2024_4_60

[16] Shapovalov V.V., Shcherbak P.N., Kharlamov P.V. et al. Improving the energy efficiency of power transmissions of a rolling stock on the basis of dynamic anisotropy of frictional contact. *E3S Web Conf.*, 2019, vol. 104, art. 01002, doi: https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910401002

[17] Бухарин Н.А., Прозоров В.С., Щукин М.М. *Автомобили. Конструкция, нагрузочные режимы, рабочие процессы, прочность агрегатов автомобиля*. Ленинград, Машиностроение, 1973. 504 с.

[18] Щербак П.Н., Кульбикаян Р.В. Физико-математическое моделирование фрикционной пары «колесо–рельс» в условиях граничного трения. *Транспорт: наука, образование, производство. Тр. межд. науч.-практ. конф*. Т. 1. Ростов-на-Дону, РГУПС, 2023, с. 332–335.

[19] Мукутадзе М.А., Опацких А.Н., Озябкин А.Л. и др. Оценка коэффициента трения модифицированной конструкции радиального подшипника скольжения. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки*, 2024, № 4, с. 72–80, doi: https://doi.org/10.17213/1560-3644-2024-4-72-80

[20] Головин Ю.И. *Наноиндентирование и его возможности*. Москва, Машиностроение, 2009. 312 с.

[21] ГОСТ Р 8.748–2011. *Металлы и сплавы. Измерение твердости при инструментальном индентировании*. Ч. 1. *Метод испытаний*. Москва, Стандартинформ, 2013. 28 с.

[22] ГОСТ Р 50779.25–2005. *Статистические методы. Статистическое представление данных. Мощность тестов для средних и дисперсий*. Москва, Стандартинформ, 2006.

[23] ГОСТ Р ИСО 16269-4–2017. *Статистические методы. Представление данных*. Ч. 4. *Выявление и обработка выбросов*. Москва, Стандартинформ, 2018. 48 с.

[24] DIN 50324–1992. *Tribology; testing of friction and wear (ball-on-disc)*. Berlin, Deutsches Institut für Normung, 1992. 15 p.

[25] *ASTM G99–17. Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus*. West Conshohocken, ASTM International, 2017. 9 p

[26] Мотренко П.П., Колесников В.И., Сычев И.Б. и др. *Устройство для испытаний материалов на износ и трение*. Патент РФ 2825725. Заявл. 16.04.2024, опубл. 28.08.2024.

[27] Политыко К.Н., Колесников И.В., Мантуров Д.С. Анализ технологий нанесения высокоэнтропийных покрытий методом физического осаждения. *Advanced Engineering Research*, 2024, т. 24, № 4, с. 369–391, doi: https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-369-391

[28] Константинов С.В., Комаров Ф.Ф., Чижов И.В. и др. Структура и микромеханические свойства покрытий TiAlSiN, TiAlSiCN, сформированных методом реактивного магнетронного распыления. *Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук*, 2023, т. 59, № 3, с. 241–252, doi: https://doi.org/10.29235/1561-2430-2023-59-3-241-252

[29] Ye Y., Liu Z., Liu W. et al. Effect of interlayer design on friction and wear behaviors of CrAlSiN coating under high load in seawater. *RSC Advю*, 2018, vol. 8, no. 10, pp. 5596–5607, doi: https://doi.org/10.1039/c7ra12409k

[30] Maksakova O.V., Pogrebnjak O.D., Beresnev V.M. Features of investigations of multilayer nitride coatings based on Cr and Zr. *Prog. Phys. Met.*, 2018, vol. 19, no. 1, pp. 25–48, doi: https://doi.org/10.15407/ufm.19.01.025

[31] Терюкалова Н.В., Новицкая О.С., Сизова О.В. Микроструктура и триботехнические свойства многослойных ионно-плазменных покрытий покрытий CrN–TiN. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2021, № 12-1, с. 81–85, doi: https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.011

[32] Криони Н.К., Рамазанов К.Н., Мингажева А.А. и др. Влияние ионно-имплантационной активации сталей 40Х и 40ХН на свойства азотированного слоя. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2025, т. 21, № 3, с. 120–123, doi: https://doi.org/10.36652/1813-1336-2025-21-3-120-123

[33] Сидашов А.В., Бойко М.В., Козаков А.Т. и др. Исследование свойств покрытий CrAlSiN спектроскопическими методами. *Вестник машиностроения*, 2022, № 2, с. 60–64, doi: https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-2-60-64

[34] Севальнев Г.С., Нефедкин Д.Ю., Дульнев К.В. и др. Исследование характеристик мартенситостареющей стали при триботехническом нагружении. *Труды ВИАМ*, 2024, № 10, с. 3–12, doi: https://doi.org/10.18577/2307-6046-2024-0-10-3-12

References

[1] Polyakov V.S., ed. *Spravochnik po muftam* [Couplings handbook]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979. 343 p. (In Russ.).

[2] *Highly flexible couplings*. voith.com: website. URL: https://voith.com/corp-en/highly-flexible-couplings.html (accessed: 05.01.2026).

[3] Hristov H., Tenev S., Mehmedov I. A study of the dynamic stiffness of flexible couplings with a rubber–metal element type SEGME. *Eng. Proc.*, 2024, vol. 60, no. 1, art. 26, doi: https://doi.org/10.3390/engproc2024060026

[4] Ozyabkin A.L., Sanamyan G.V. Diagnostics of the friction-mechanical system of the splined connection of the transmission. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii. Innovatsionnoe mashinostroenie* [Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making], 2025, no. 7, pp. 306–310. (In Russ.).

[5] Shapovalov V.V., Sladkovski A., Erkenov A.Ch. Actual problems of modern tribotechnology and ways of solution. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2015, no. 1, pp. 64–75, doi: http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2015-1-64-75 (in Russ.).

[6] Fan Q., Zhang S., Lin J. et al. Microstructure, mechanical and tribological properties of gradient CrAlSiN coatings deposited by magnetron sputtering and arc ion plating technology. *Thin Solid Films*, 2022, vol. 760, art. 139490, doi: https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139490

[7] Tritremmel C., Daniel R., Lechthaler M. et al. Influence of Al and Si content on structure and mechanical properties of arc evaporated Al–Cr–Si–N thin films. *Thin Solid Films*, 2013, vol. 534, pp. 403–409, doi: https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.03.017

[8] Yuan Z., Han Y., Zang S. et al. Analysis of the mechanical properties of TiN/Ti multilayer coatings using indentation under a broad load range. *Ceram. Int.*, 2021, vol. 47, no. 8, pp. 10796–10808, doi: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.196

[9] Kovalev A.I., Vakhrushev V.O., Beake B.D. et al. Damage accumulation phenomena in multilayer (TiAlCrSiY)N/(TiAlCr)N, monolayer (TiAlCrSiY)N coatings and silicon upon deformation by cyclic nanoindentation. *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, no. 8, art. 1312, doi: https://doi.org/10.3390/nano12081312

[10] Sui X., Li G., Jiang C. et al. Improved toughness of layered architecture TiAlN/CrN coatings for titanium high speed cutting. *Ceram. Int*., 2018, vol. 44, no. 5, pp. 5629–5635, doi: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.210

[11] Pogrebnjak A.D., Kravchenko Y.O., Bondar O.V. et al. Structural features and tribological properties of multilayer coatings based on refractory metals. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf*., 2018, vol. 54, no. 2, pp. 240–258, doi: https://doi.org/10.1134/S2070205118020107

[12] Teles V.C., de Mello J.D.B., da Silva W.M. Abrasive wear of multilayered/gradient CrAlSiN PVD coatings: effect of interface roughness and of superficial flaws. *Wear*, 2017, vol. 376-377, part B, pp. 1691–1701, doi: https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.116

[13] Bobzin K., Brögelmann T., Kruppe N.C., Carlet M. Investigation on the incorporation of oxygen and thermal stability of HPPMS TiAlCrSiON nanolayer coatings," *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 418, p. 127231, doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.127231

[14] Kolesnikov V.I., Kudryakov O.V., Varavka V.N. et al. Structural-phase state and properties of Cr-Al-Si-N coatings obtained by vacuum arc plasma deposition. *Phys. Mesomech*., 2023, vol. 26, no. 2, pp. 126–136, doi: https://doi.org/10.1134/S1029959923020029

[15] Shapovalov V.V., Sayamova T.L., Gorin S.L. et al. Development of a friction multi-disc connecting coupling for mobile power plants. *Vestnik RGUPS*, 2024, no. 4, pp. 60–69, doi: https://doi.org/10.46973/0201–727X_2024_4_60 (in Russ.).

[16] Shapovalov V.V., Shcherbak P.N., Kharlamov P.V. et al. Improving the energy efficiency of power transmissions of a rolling stock on the basis of dynamic anisotropy of frictional contact. *E3S Web Conf*., 2019, vol. 104, art. 01002, doi: https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910401002

[17] Bukharin N.A., Prozorov V.S., Shchukin M.M. *Avtomobili. Konstruktsiya, nagruzochnye rezhimy, rabochie protsessy, prochnost agregatov avtomobilya* [Automobiles. Design, load conditions, operating processes, and strength of automobile units]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1973. 504 p. (In Russ.).

[18] Shcherbak P.N., Kulbikayan R.V. [Physical and mathematical modeling of a wheel-rail friction pair under conditions of boundary friction]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo. Tr. mezhd. nauch.-prakt. konf*. T. 1 [Transport: Science, Education, and Production. Proc. Int. Sci.-Pract. Conf. Vol. 1]. Rostov-na-Donu, RGUPS Publ., 2023, pp. 332–335. (In Russ.).

[19] Mukutadze M.A., Opatskikh A.N., Ozyabkin A.L. et al. Evaluation of the friction coefficient of a modified design of a radial plain bearing. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences], 2024, no. 4, pp. 72–80, doi: https://doi.org/10.17213/1560-3644-2024-4-72-80 (in Russ.).

[20] Golovin Yu.I. *Nanoindentirovanie i ego vozmozhnosti* [Nanoindentation and its capabilities]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 312 p. (In Russ.).

[21] GOST R 8.748–2011. *Metally i splavy. Izmerenie tverdosti pri instrumentalnom indentirovanii*. Ch. 1. *Metod ispytaniy* [State standard GOST R 8.748–2011. State system for ensuring the uniformity of measurements. Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 1. Test method]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 28 p. (In Russ.).

[22] GOST R 50779.25–2005. *Statisticheskie metody. Statisticheskoe predstavlenie dannykh. Moshchnost testov dlya srednikh i dispersiy* [State standard. GOST R 50779.25–2005. Statistical interpretation of data — power of tests relating to means and variances (MOD)]. Moscow, Standartinform Publ., 2006. (In Russ.).

[23] GOST R ISO 16269-4–2017. *Statisticheskie metody. Predstavlenie dannykh*. Ch. 4. *Vyyavlenie i obrabotka vybrosov* [State standard GOST R ISO 16269-4–2017. Statistical methods. Statistical data presentation. Part 4. Detection and treatment of outliers]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 48 p. (In Russ.).

[24] DIN 50324–1992. *Tribology; testing of friction and wear (ball-on-disc)*. Berlin, Deutsches Institut für Normung, 1992. 15 p.

[25] ASTM G99–17. *Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus*. West Conshohocken, ASTM International, 2017. 9 p
[26] Motrenko P.P., Kolesnikov V.I., Sychev I.B. et al. *Ustroystvo dlya ispytaniy materialov na iznos i trenie* [Device for testing materials for wear and friction]. Patent RU 2825725. Appl. 16.04.2024, publ. 28.08.2024. (In Russ.).
[27] Polityko K.N., Kolesnikov I.V., Manturov D.S. Analysis of technologies for applying high-entropy coatings by physical deposition method. *Advanced Engineering Research*, 2024, vol. 24, no. 4, pp. 369–391, doi: https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-369-391 (in Russ.).
[28] Konstantinov S.V., Komarov F.F., Chizhov I.V. et al. The structure and micromechanical properties of tialsin, tialsicn coatings formed by the method of reactive magnetron sputtering. *Vestsi NAN Belarusi. Ser. fiz.-mat. navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics Series], 2023, vol. 59, no. 3, pp. 241–252, doi: https://doi.org/10.29235/1561-2430-2023-59-3-241-252 (in Russ.).
[29] Ye Y., Liu Z., Liu W. et al. Effect of interlayer design on friction and wear behaviors of CrAlSiN coating under high load in seawater. *RSC Advyu*, 2018, vol. 8, no. 10, pp. 5596–5607, doi: https://doi.org/10.1039/c7ra12409k
[30] Maksakova O.V., Pogrebnjak O.D., Beresnev V.M. Features of investigations of multilayer nitride coatings based on Cr and Zr. *Prog. Phys. Met*., 2018, vol. 19, no. 1, pp. 25–48, doi: https://doi.org/10.15407/ufm.19.01.025
[31] Teryukalova N.V., Novitskaya O.S., Sizova O.V. Microstructure and tribotechnical properties of multilayer ion-plasma coatings CrN–TiN. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatelskiy zhurnal* [International Research Journal], 2021, no. 12–1, pp. 81–85, doi: https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.114.12.011 (in Russ.).
[32] Krioni N.K., Ramazanov K.N., Mingazheva A.A. et al. Effect of ion-implantation activation of surface of structural steels 40kh and 40khn on structure and properties of nitrided layer. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening technologies and coatings], 2025, vol. 21, no. 3, pp. 120–123, doi: https://doi.org/10.36652/1813-1336-2025-21-3-120-123 (in Russ.).
[33] Sidashov A.V., Boyko M.V., Kozakov A.T. et al. Properties of CrAlSiN coatings: spectroscopic research. *Vestnik mashinostroeniya*, 2022, no. 2, pp. 60–64, doi: https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-2-60-64 (in Russ.). (Eng. version: *Russ. Engin. Res*., 2022, vol. 42, no. 5, pp. 477–481, doi: https://doi.org/10.3103/S1068798X22050264)
[34] Sevalnev G.S., Nefedkin D.Yu., Dulnev K.V. et al. Study of the characteristics of maraging steel under tribotechnical loading. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2024, no. 10, pp. 3–12, doi: https://doi.org/10.18577/2307-6046-2024-0-10-3-12 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 18.05.2026

Информация об авторах

КОЛЕСНИКОВ Владимир Иванович — академик РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика». ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» (344038, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, e-mail: kvi@rgups.ru).

КОВАЛЕНКО Олег Игоревич — младший научный сотрудник кафедры «Теоретическая механика». ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» (344038, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, e-mail: olegkovalenko2000@mail.ru).

Information about the authors

KOLESNIKOV Vladimir Ivanovich — Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Department of Theoretical Mechanics. Rostov State Transport University (344038, Rostov-on-Don, Russian Federation, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Square, Bldg. 2, e-mail: kvi@rgups.ru).

KOVALENKO Oleg Igorevich — Junior Researcher, Department of Theoretical Mechanics. Rostov State Transport University (344038, Rostov-on-Don, Russian Federation, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Square, Bldg. 2, e-mail: olegkovalenko2000@mail.ru).

ПОЛИТЫКО Кирилл Николаевич — младший научный сотрудник кафедры «Теоретическая механика». ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» (344038, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, e-mail: politykokirill@yandex.ru).

POLITYKO Kirill Nikolaevich — Junior Researcher, Department of Theoretical Mechanics. Rostov State Transport University (344038, Rostov-on-Don, Russian Federation, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Square, Bldg. 2, e-mail: politykokirill@yandex.ru).

ШАПОВАЛОВ Владимир Владимирович — доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование и технология производства машин». ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» (344038, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, e-mail: sha.vv@bk.ru).

SHAPOVALOV Vladimir Vladimirovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Design and Technology of Production of Machines Department. Rostov State Transport University (344038, Rostov-on-Don, Russian Federation, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Square, Bldg. 2, e-mail: sha.vv@bk.ru).

КОЛЕСНИКОВ Игорь Владимирович — доктор технических наук, член-корреспондент РАН, доцент кафедры «Теоретическая механика». ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» (344038, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, e-mail: ivkolesnikov@bk.ru).

KOLESNIKOV Igor Vladimirovich — Doctor of Science (Eng.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Associate Professor, Department of Theoretical Mechanics. Rostov State Transport University (344038, Rostov-on-Don, Russian Federation, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Square, Bldg. 2, e-mail: ivkolesnikov@bk.ru).

КОЛОДЯЖНЫЙ Илья Алексеевич — аспирант кафедры «Проектирование и технология производства машин». ФГБОУ ВО Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС) (344038, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, площадь Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, e-mail: 1nexus2mod@gmail.com).

KOLODYAZHNY Ilya Alekseevich — Postgraduate, Design and Technology of Production of Machines Department. Rostov State Transport University (344038, Rostov-on-Don, Russian Federation, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Square, Bldg. 2, e-mail: 1nexus2mod@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:
Колесников В.И., Коваленко О.И., Политыко К.Н., Шаповалов В.В., Колесников И.В., Колодяжный И.А. Влияние инновационного многослойного ионно-плазменного покрытия CrAlSiN/Cr на износостойкость многодисковой фрикционной муфты путевой машины в северных условиях эксплуатации. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 11, с. 14–30.

Please cite this article in English as:
Kolesnikov V.I., Kovalenko O.I., Polityko K.N., Shapovalov V.V., Kolesnikov I.V., Kolodyazhny I.A. Effect of an innovative multilayer ion-plasma CrAlSiN/Cr coating on the wear resistance of a multi-disc friction clutch in a track maintenance machine under northern operating conditions. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 11, pp. 14–30.