https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-3-25-32
УДК 621.74

Поступила 24.07.2026
Received 24.07.2026

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗНОСОСТОЙКИХ ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

А. А. БУСЕЛ, ОАО «БЕЛНИИЛИТ», г. Минск, Беларусь, ул. Машиностроителей, 28.
E-mail: artsiom.busel@belniilit.by
Г. А. РУМЯНЦЕВА, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65
Д. М. ГОЛУБ, ОАО «БЕЛНИИЛИТ», г. Минск, Беларусь, ул. Машиностроителей, 28.
E-mail: d.golub@belniilit.by

В статье рассмотрены экономические и технические вопросы повышения ресурса литых деталей, работающих в условиях интенсивного трения и абразивного износа. Приведен анализ современных научных подходов к улучшению свойств литых износостойких сплавов, выбору режимов термической обработки, а также к применению поверхностных покрытий. Рассмотрен также инновационный опыт ведущих стран в машиностроении по замене твердого хромирования и внедрению технологий восстановления изношенных деталей (их рабочих поверхностей и размеров).

Ключевые слова. *Износ, абразивный износ, коррозионно-механический износ, высокохромистый белый чугун, ADI, термическая обработка, HVOF, лазерная наплавка, аморфные покрытия, лазерное текстурирование, замена твердого хромирования, ОАО «БЕЛНИИЛИТ», отливка, технология.*

Для цитирования. *Бусел, А. А. Анализ способов повышения эксплуатационных характеристик износостойких деталей в машиностроении / А. А.Бусел, Г. А. Румянцева, Д. М. Голуб // Литье и металлургия. 2026. № 3. С. 25–32. https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-3-25-32.*

ANALYSIS OF METHODS FOR IMPROVING THE SERVICE PERFORMANCE OF WEAR-RESISTANT COMPONENTS IN MECHANICAL ENGINEERING

A. A. BUSEL, OJSC "BELNIILIT", Minsk, Belarus, 28, Mashinostroiteley str. E-mail: artsiom.busel@belniilit.by
G. A. RUMYANTSEVA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti Ave.
D. M. GOLUB, OJSC "BELNIILIT", Minsk, Belarus, 28, Mashinostroiteley str. E-mail: d.golub@belniilit.by

This paper addresses the economic and technical aspects of extending the service life of cast components operating under conditions of intensive friction and abrasive wear. A review of contemporary scientific approaches is presented, covering the improvement of properties in cast wear-resistant alloys, the selection of heat treatment parameters, and the application of surface coatings. Special consideration is given to the innovative experience of leading industrial nations regarding the replacement of hard chrome plating and the implementation of technologies for the reconditioning of worn components, including the restoration of their working surfaces and dimensional accuracy.

Keywords. *Wear, abrasive wear, corrosive-mechanical wear, high-chromium white iron, ADI, heat treatment, HVOF, laser cladding, amorphous coatings, laser surface.*

For citation. *Busel A. A., Rumyantseva G. A., Golub D. M. Analysis of methods for improving the service performance of wear-resistant components in mechanical engineering. Foundry production and metallurgy, 2026, no. 3, pp. 25–32. https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-3-25-32.*

Разработка современных методов повышения долговечности литых деталей, работающих в условиях интенсивного трения, связана с практической задачей на производстве: снизить затраты на эксплуатацию и избежать аварийных простоев сложного оборудования. Для машиностроительных предприятий Республики Беларусь это один из прямых (может важных) путей повышения конкурентоспособности. Новые износостойкие сплавы и современные методы упрочнения помогают увеличить межремонтный интервал, уменьшить расход металла и обеспечить стабильную работу деталей в тяжелых условиях.

Эксплуатационные характеристики износостойких деталей (в горнодобывающей, металлургической, транспортной, энергетической и других отраслях) сегодня важны не только с точки зрения надежности,

но и с точки зрения затрат предприятия. Эти затраты складываются из двух частей: потери энергии на трение в узлах (подшипники, направляющие, шестерни, гидроцилиндры и др.) и расходы на ремонт, когда деталь изнашивается и требует восстановления или замены. Чем меньше трение и износ, тем меньше электроэнергии (или топлива) нужно на ту же работу агрегата, и тем реже требуется его ремонт.

В обзорной работе K. Holmberg и A. Erdemir показано, что около 23 % мирового энергопотребления связано с трибологическими контактами, т.е. с зонами, где поверхности деталей работают в условиях относительного движения и изнашивания. При этом порядка 20 % энергии уходит на преодоление трения, а около 3 % – на ремонт, восстановление и замену деталей из-за износа и отказов [1]. Поэтому технологии, повышающие ресурс износостойких деталей (в том числе литых), дают эффект не только «по твердости», но и «по экономике»: они снижают потери энергии на трение, уменьшают число остановок оборудования, сокращают потребность в запасных частях и уменьшают объем ремонтных операций. Это напрямую влияет на себестоимость и стабильность производства.

На практике условия работы деталей усложняются. Все реже встречается «чистый» абразивный износ, когда поверхность просто стирается песком, рудой или другим материалом. Гораздо чаще действуют смешанные виды изнашивания: коррозионно-абразивный, эрозионно-коррозионный, абразивно-ударный и др. В таких режимах коррозия разрушает защитную пленку на поверхности и ослабляет матрицу, а абразив и удар ускоряют снятие металла – в итоге износ идет быстрее. На примере высокохромистых белых чугунов [2] отмечено, что при усложнении среды износ часто идет «в присутствии коррозии» и это ускоряет деградацию деталей. Поэтому актуальна разработка заэвтектических высокохромистых белых чугунов (HHCCI), которые могут обеспечивать более высокую износо- и коррозионую стойкость и больший срок службы. Важно учитывать и другой момент: в таких условиях износостойкость уже нельзя оценивать «в среднем по материалу». Она сильно зависит от того, насколько микроструктура (карбиды и матрица) подходит под конкретный режим нагрузки и конкретную среду [2].

Один из самых результативных путей повышения ресурса в литейной практике – управление микроструктурой и фазовым составом. Для высокохромистых белых чугунов (в том числе заэвтектических) решающую роль играют карбиды и состояние матрицы. Гипоэвтектические высокохромистые чугуны имеют структуру из первичного аустенита и эвтектики (γ + M7C3), а матрица может переходить в мартенсит или бейнит при охлаждении и/или термообработке [3]. Для заэвтектических чугунов характерно наличие первичных карбидов M7C3 и эвтектики (γ + M7C3). Повышенная доля карбидов увеличивает твердость и может повышать коррозионно-износную стойкость [2]. Здесь M7C3 – это твердые карбиды типа (Cr, Fe)7C3, которые и «держат» абразивный износ. Но есть и проблема: крупные первичные карбиды M7C3, как грубые и хрупкие, склонны к растрескиванию при износе. Поэтому современные исследования и разработки в этой области направлены на то, чтобы измельчать (рафинировать) первичные карбиды и подбирать матрицу так, чтобы уменьшить выкрашивание, но сохранить сопротивление абразивному «резанию».

С практической точки зрения важными инструментами здесь остаются легирование и термическая обработка – для управления размером и распределением карбидов, а также «настройки» матрицы. В [3] перечислены направления повышения корозийной износостойкости: рафинирование первичных карбидов, термообработка, криообработка и легирование. Показано, что механизмы разрушения при одновременном действии коррозии и износа до конца не раскрыты и это требует дальнейших исследований. Также приводится пример влияния карбидообразующих элементов: отмечено, что увеличение содержания ванадия в пределах 0–1,0 мас. % связывают с измельчением карбидов и ростом коррозионно-износной стойкости (за счет распределения ванадия в карбидах, зернорафинирования и появления центров кристаллизации) [3]. В технологическом смысле задача формулируется просто: нужно получить структуру, где карбиды реально защищают от абразива, а матрица и границы фаз не становятся слабым местом при ударных и коррозионных нагрузках.

Еще одно важное направление для литых деталей – применение высокопрочного чугуна после изотермической закалки (ADI). В ADI формируется аусферритная структура (игольчатый феррит + углеродонасыщенный аустенит), которая дает хорошее сочетание прочности и работоспособности в контактах качения и скольжения. ADI рассматривается как материал, который может заменять традиционные стальные отливки и поковки [3]. Требование высокой износостойкости связывают с работой деталей типа распределительных валов и клапанов, которые работают в контакте и перемещаются под нагрузкой. Для повышения комплекса свойств указана целесообразность двухступенчатого аусферритного превращения (dualstep austempering), а также дополнительных поверхностных упрочняющих обработок.

Для практики важен именно такой подход: не одна «универсальная» обработка, а сочетание режимов, где термообработка задает базовую структуру, а поверхностное упрочнение помогает выдерживать контактные напряжения и износ.

Большая часть современной проблематики (и одновременно возможностей) сегодня связана с поверхностной инженерией. Поверхностная инженерия – это комплекс технологий, которые изменяют или создают на поверхности детали специальный рабочий слой (покрытие, наплавку, упрочненную или текстурированную зону), чтобы повысить износостойкость, коррозионную стойкость и ресурс детали без замены материала всей детали. Причины две: во-первых, ужесточаются экологические и регуляторные требования к процессам на основе Cr(VI), во-вторых, промышленности нужны технологии, которые позволяют ремонтно восстанавливать размеры. Твердое хромирование является критически важной технологией обслуживания на объектах DoD: оно используется и для нанесения твердых покрытий (например, на элементы шасси и приводы), и для восстановления изношенных или корродировавших компонентов. Отмечено, что применяется хром в шестивалентном состоянии (hex-Cr), который охарактеризован как канцероген, и что нормы по выбросам и воздействию на персонал создают экономическое давление и стимулируют переход на альтернативы. В Европе фактор регулирования также остается ключевым. ECHA сообщала, что на 08.06.2021 г. поступили уведомления более чем с 1000 производственных объектов (промышленных площадок) по всей Европе, которые подтверждали широкое использование триоксида хрома в функциональном (твердом) хромировании, а действующие авторизации должны были истекать в сентябре 2024 г. при необходимости подачи reviewотчета в ECHA к марту 2023 г. [5]. В ECHA Weekly от 11.02.2026 указано, что ожидается введение режима «ограничения», который должен заменить текущий подход авторизации REACH, ориентировочно к концу 2028 г. [6]. В Великобритании по линии UK REACH также действуют решения по авторизациям: на GOV.UK опубликовано решение для SEA Chromium Trioxide Authorisation Consortium (hard chrome, inhouse) с датой 19.02.2025 г. и разрешенным использованием hard chromium electroplating триоксида хрома [7].

В этих условиях особенно востребованы технологии, которые дают высокий ресурс при износе и одновременно снижают экологические и производственные риски по сравнению с хромированием. В качестве практического ориентира можно использовать материалы TWI. В их FAQ отмечено, что за последнее десятилетие HVOF-покрытия все чаще применяют как альтернативу твердому хромированию, особенно когда есть одновременно износ и коррозия. Среди преимуществ в [8] указаны меньший экологический эффект и то, что WC/Cr/Co-покрытия могут давать абразивную износостойкость в 4–5 раз выше, чем hard chrome. Bard chrome plating может снижать усталостные свойства подложки на 30–50 %, тогда как HVOF-покрытия, по данным [8], оказывают незначительное влияние на усталость. На практике это означает, что технологию покрытия нельзя выбирать только по твердости или износу: для ответственных деталей (валы, штоки, элементы шасси и др.) нужно учитывать и усталостный ресурс основы.

Прикладные экспериментальные данные показывает статья Wu–Pan–Duan–Wan–Yang–Gao–Yu по восстановлению гидростойкости. Авторы сравнивают hard chrome plating и HVOF-покрытия. Они указывают, что в слое хрома есть микротрещина, толщина покрытия 26–28 мкм, микротвердость порядка 778,6 ± 25,4 HV. Для HVOF-покрытия приведена толщина 420–450 мкм, более плотная структура без явных трещин и пор, а также микротвердость WC10Co4Cr-слоя 1163,6 ± 12,4 HV [4]. Показано, что различные покрытия демонстрируют неодинаковое поведение в условиях коррозии: в нейтральном солевом тумане hard chrome демонстрирует ржавление на 144 ч, WC10Co4Cr – на 120 ч, тогда как Ni60 и 316L показывают ржавление на 720 ч (рис. 1).

По абразивному износу износостойкость WC10Co4Cr более чем в 4 раза выше, чем у hard chrome [9]. Эти результаты свидетельствуют о важности выбора технологии: максимальная износостойкость и максимальная коррозионная стойкость не всегда достигаются одним и тем же покрытием, поэтому выбор нужно делать под доминирующий механизм разрушения в конкретных условиях.

Отдельное быстроразвивающееся направление – лазерная наплавка (laser cladding) и получение Fe-основных аморфных или аморфно-нанокристаллических покрытий. Здесь ключевые преимущества – плотный слой, прочная связь с подложкой и высокая коррозионная стойкость при сохранении трибологических свойств. Приведено, что плазменное напыление может давать более высокую долю аморфной фазы, но поры и микротрещины ухудшают коррозионную стойкость, так как через них быстрее проникает среда. Покрытия, полученные laser cladding, описаны как плотные, без трещин и заметных дефектов, с более высокой коррозионной стойкостью. Приведено, что износ (по объему/площади следа) у покрытий, полученных двумя методами, по сравнению с подложкой снижался примерно на порядок.

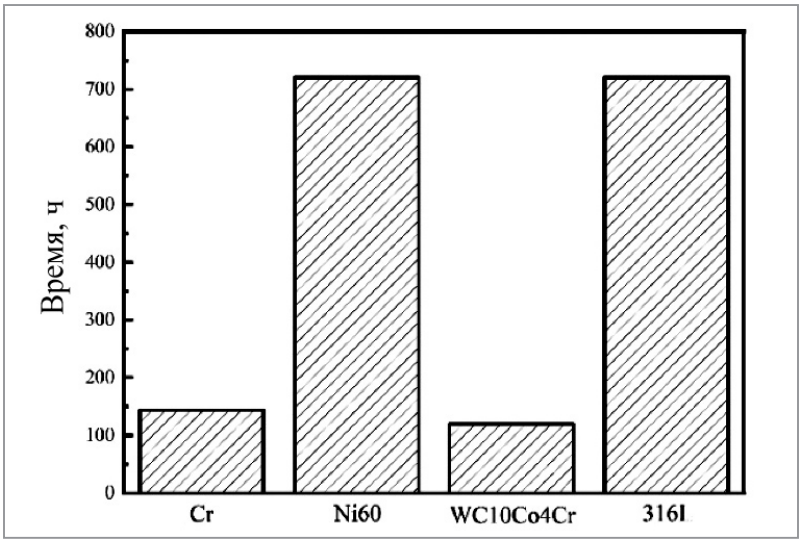


Рис. 1. Испытание на стойкость к солевому туману твердого хромирования и покрытий, полученных методом высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF)

Более высокая износостойкость laserclad покрытия по сравнению с plasmasprayed объясняется тем, что дефекты (поры/микротрещины) и слоистость напыленного покрытия повышают риск отслаивания при трении [10] (рис. 2).

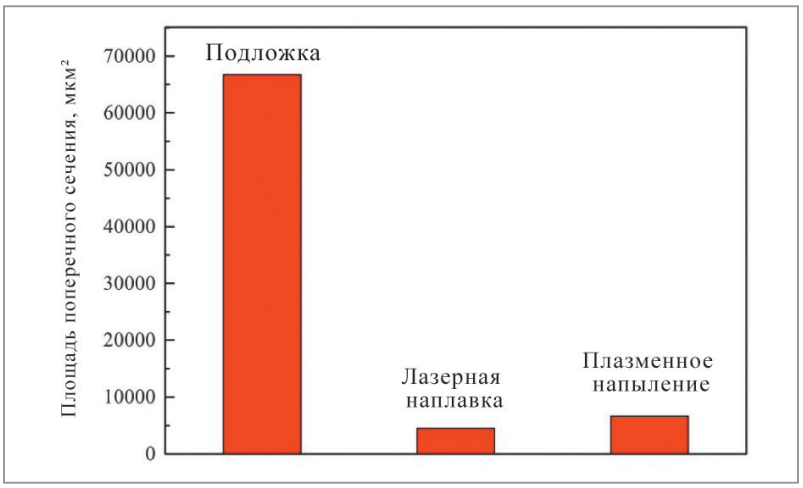


Рис. 2. Объемы следов износа на подложке из стали 45, покрытии, полученном методом лазерной наплавки, и покрытии, нанесенном плазменным напылением

Для литейной и ремонтной практики это означает следующее: laser cladding можно рассматривать как способ сформировать «рабочий слой», который одновременно плотный (как барьер) и износостойкий, а также подходит для восстановления геометрии детали.

Современный опыт (в том числе в Китае) показывает развитие лазерной наплавки за счет дополнительных физических воздействий, например ультразвука. В [11] описано нанесение Fe-основного аморфного покрытия на сталь AISI 1020 методом laser cladding с ультразвуковым воздействием. Приведены параметры оборудования (в том числе 6 кВт полупроводниковый лазер и 1 кВт ультразвуковой генератор), а также состав порошка Fe41Co7Cr15Mo14C15B6Y2 (ат.%). Для повышения ресурса здесь важно не столько «необычность» состава, сколько сам тренд: промышленность все чаще уходит от схемы «материал + обычная обработка» к комбинированным процессам, где можно управлять формированием структуры и снижать дефектность покрытия, чтобы повысить стойкость (в том числе коррозионную).

Еще один современный подход, который хорошо сочетается с покрытиями и термообработкой,– лазерное текстурирование поверхности (laser surface texturing, LST). Цель – управлять работой контакта и режимом смазки. В [12] отмечено, что микро- и наноструктуры, получаемые лазерным текстурированием, могут менять распределение нагрузки, помогать удерживать смазку и выводить продукты износа. За счет этого можно снижать трение и повышать износостойкость. Для износостойких деталей (в том

числе литых) практический смысл LST в том, что можно «подстроить» поверхность под конкретный режим работы (смазка, наличие абразива) без полной замены материала детали. При этом на практике LST чаще применяют как часть комбинированной технологии (например, «текстура + покрытие»), а не как единственный метод повышения ресурса.

Опыт США показывает, что важную роль играют программы DoD и проверка (валидация) покрытий для ответственных узлов. В [13] ставится задача заменить hard chrome на HVOF WC/Co для авиационного шасси. Показано, что DoD развивал программу квалификации HVOF-покрытий как альтернативы hard chrome и был разработан Joint Test Protocol с испытаниями на усталость, коррозию и износ. Приведен пример практической эксплуатации: Lufthansa Airlines совместно с Boeing выполняли испытания на nose landing gear Boeing 737300 и сообщали о более чем 2500 полетных циклах без деградации HVOF-покрытий и с лучшей совместимостью с гидроуплотнениями по сравнению с hard chrome. В Европе и Великобритании, помимо технических задач, усиливается фактор комплаенса: решения UK REACH по авторизациям показывают, что технология твердого хромирования не «исчезает мгновенно», но попадает в режим разрешений и отчетности. Это увеличивает издержки и ускоряет переход к альтернативам [12]. В Китае наблюдается высокий интерес к наплавке, аморфным Fe-покрытиям и HVOF-решениям. Обзорная статья показывает масштабы применения thermal spray в промышленности и приводит данные, что thermal spray в сталелитейной/сталепроизводящей отрасли составляет порядка 20 % доли промышленных применений [14].

В целом международный опыт по износу и замене твердого хромирования показывает следующее: переход идет по-разному в разных странах и отраслях, но направление одно – расширение применения thermal spray, лазерной наплавки и других технологий, которые не требуют ванн Cr(VI). Можно выделить общую логическую схему повышения эксплуатационных характеристик износостойких деталей: определить главный механизм разрушения (абразив, удар, коррозия, эрозия и их сочетания) и цену отказа (безопасность, простой, ремонт), выбрать базовый материал и микроструктуру под нагрузку (например, управлять карбидами в высокохромистых чугунах или применять ADI с правильно выбранным режимом изотермической закалки) [2, 3], применить поверхностную технологию, чтобы перенести нужные свойства в рабочий слой (HVOF/HVAF, лазерная наплавка, аморфные покрытия, текстурирование) с учетом усталости, коррозии, шероховатости и ремонтопригодности [8–12], учитывать экологические и регуляторные ограничения, которые в 2020-е годы все чаще становятся таким же важным критерием выбора, как износ и стоимость. Поэтому современная проблема этой области – не «нехватка износостойких материалов», а необходимость стабильно и повторяемо внедрить выбранную комбинацию материала, термообработки и покрытия в реальные условия производства и нормирования, чтобы гарантировать ресурс в эксплуатации [5–7].

Заметный вклад в развитие подходов к повышению износостойкости литых материалов внес Adel Nofal. В его работах по высокохромистым белым чугунам показано, что ресурс детали определяется не только уровнем твердости, но и тем, насколько правильно сформирована структура сплава: размер и распределение карбидов, а также состояние металлической матрицы. Так, в статье по гипоэвтектическому белому чугуну 15 % Cr–2 % Mo рассмотрена связь «микроструктура – абразивный износ» и показано влияние структурных факторов на износостойкость [15]. В работе по структурному измельчению 15 % Cr–2 % Mo белых чугунов отдельно рассматриваются способы рафинирования структуры с применением динамической кристаллизации и добавок Nb, что важно для снижения хрупкого разрушения карбидной фазы при изнашивании [16].

Отдельно в исследованиях Adel Nofal рассматриваются материалы семейства ADI и CADI как практичные варианты для деталей, которым нужен баланс прочности и износостойкости. В работе по CADI отмечается задача повышения ударной вязкости и высокой износостойкости за счет управления количеством, размером и морфологией карбидов в структуре [17]. В тезисах доклада, посвященного ADI, подчеркивается развитие металлургических подходов и расширение областей применения ADI как конструкционного материала [18].

Наряду с выбором состава и термообработки в работах Adel Nofal и соавторов рассматриваются и поверхностные технологии как инструмент повышения ресурса. В статье по лазерной наплавке показано получение износостойкого слоя на Ti-6Al-4V при использовании порошковой смеси WC и NiCrBSi, что иллюстрирует общий подход поверхностной инженерии: нужные свойства задаются рабочему слою без замены материала всей детали [19]. Также показано, что легирование может заметно менять износ при повышенных температурах: в статье по SiMo-высококремнистому высокопрочному чугуну рассмотрено влияние молибдена на микроструктуру и высокотемпературный износ [20].

Данная тематика приобретает для Республики Беларусь повышенное практическое значение. Опираясь на развитый машиностроительный комплекс, страна объективно испытывает высокую потребность как в износостойких комплектующих, так и в эффективных технологиях их восстановления. Научная база для таких работ в Беларуси есть: в структуре НАН Беларуси работают организации, которые развивают направления материаловедения, защитных покрытий и трибологии. Так, Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа НАН Беларуси занимается разработкой материалов и покрытий; отмечается, что у института есть «десятки уникальных технологий», а среди результатов взаимодействия называются защитные покрытия для узлов и агрегатов космической техники [21]. На официальном ресурсе института также указано, что тематика включает разработку и применение новых материалов, в том числе защитных покрытий и технологий сварки/импульсной обработки [22]. Отдельно важна связка науки и промышленности: в СМИ отмечалось, что в Физико-техническом институте НАН Беларуси открыт участок, где предприятия могут отрабатывать внедрение разработок и «новинок» на практике [23]. С учетом того, что в кооперации и промышленном контуре Беларуси работают крупные машиностроительные предприятия (в том числе БЕЛАЗ, МТЗ, ММЗ, Гомсельмаш и др.) развитие собственных износостойких материалов, покрытий и ремонтных технологий напрямую поддерживает технологическую самостоятельность и импортозамещение, а также укрепляет экспортный потенциал отечественного машиностроения [24].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Holmberg, K.** Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions / K. Holmberg, A. Erdemir // Friction.– 2017.– Vol. 5.– P. 263–284.
2. **Gong, L.** Corrosion Wear of Hypereutectic High Chromium Cast Iron: A Review / L. Gong, H. Fu, X. Zhi // Metals.– 2023.– Vol. 13, no. 2.– Art. 308.
3. Microstructure, wear behavior and surface hardening of austempered ductile iron / B. Wang [et al.] // Journal of Materials Research and Technology.– 2020.– Vol. 9, iss. 5.– P. 9838–9855.
4. Replacement of Chromium Electroplating Using HVOF Thermal Spray Coatings / B. D. Sartwell [et al.] [Electronic resource].– Access mode: https://www nmfrc.org/pdf/other/0152.pdf.pdf.– Access date: 05.03.2026.
5. Chromium trioxide widely used in plating and surface treatment / European Chemicals Agency (ECHA). 8 June 2021 [Electronic resource].– Access mode: https://echa.europa.eu/-/chromium-trioxide-widely-used-in-plating-and-surface-treatment.– Access date: 27.03.2026.
6. ECHA Weekly – 11 February 2026 / European Chemicals Agency (ECHA). 11 February 2026. [Electronic resource].– Access mode: https://echa.europa.eu/view-article/-/journal_content/title/echa-weekly-11-february-2026.– Access date: 05.03.2026.
7. UK REACH authorisations for SEA Chromium Trioxide Authorisation Consortium (hard chrome (in-house)), 19 February 2025 / Department for Environment, Food & Rural Affairs (GOV.UK) [Electronic resource].– Access mode: https://www.gov.uk/government/publications/uk-reach-authorisations-for-sea-chromium-trioxide-authorisation-consortium-hard-chrome-in-house-19-february-2025.– Access date: 05.03.2026.
8. Are HVOF coatings an alternative to hard chrome plating? / TWI [Electronic resource].– Access mode: https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-are-hvof-coatings-an-alternative-to-hard-chrome-plating.– Access date: 05.03.2026.
9. Study on Wear Resistance and Corrosion Resistance of HVOF Surface Coating Refabricate for Hydraulic Support Column / M. Wu [et al.] // Coatings – 2021.– Vol. 11, no. 12. – Art. 1457.
10. Corrosion and Wear Resistance of Fe-Based Amorphous Coatings / G. Li [et al.] // Coatings.– 2020.– Vol. 10, no. 1.– Art. 73.
11. **Han, H.** Corrosion Performance of Fe-Based Amorphous Coatings via Laser Cladding Assisted with Ultrasonic in a Simulated Marine Environment / H. Han, M. Xiao, Q. Wang // Metals.– 2023.– Vol. 13, no. 12.– Art. 1938.
12. **Zhou, J.** Review of Laser Texturing Technology for Surface Protection and Functional Regulation of Aluminum Alloys: Wettability, Anti-Icing, Corrosion Resistance, and Wear Resistance / J. Zhou, J., Wu S. Tang [et al.] // Coatings.– 2025.– Vol. 15, no. 5.– Art. 567.
13. **Sartwell, B. D.** Validation of HVOF WC/Co Thermal Spray Coatings as a Replacement for Hard Chrome Plating on Aircraft Landing Gear. Naval Research Laboratory. 31 March 2004 [Electronic resource] / B. D. Sartwell [et al.].– Access mode: https://docslib.org/doc/3604927/validation-of-hvof-wc-co-thermal-spray-coatings-as-a-replacement-for-hard-chrome-plating-on-aircraft-landing-gear.– Access date: 15.03.2026.
14. Applications and Developments of Thermal Spray Coatings for the Iron and Steel Industry / S. Singh [et al.] // Materials (Basel).– 2023.– Vol. 16, no. 2.– Art. 516.
15. Microstructure – wear performance relationship of hypoeutectic 15% Cr-2% Mo white iron / R. Reda [et al.] // International Journal of Materials Research.– 2012.– Vol. 103, no. 7.– P. 838–846.
16. Structural Refinement of 15%Cr-2%Mo White Irons / A. Nofal [et al.] // Key Engineering Materials.– 2011.– Vol. 457.– P. 231–236.
17. Development of Carbidic Austempered Ductile Iron (CADI) / H. A. Aly [et al.] // Key Engineering Materials.– 2020.– Vol. 835.– P. 163–170.
18. **Nofal, A.** ADI – The Material Revolution and Its Novel Metallurgical Advances and Application at CMRDI / A. Nofal // Наука и технологии модифицирования чугуна: тезисы докладов IV Междунар. науч.-техн. конф. (STCIM–IV), 25–26 октября 2022 г.– [Электрон. ресурс].– Режим доступа: https://stcim modificator ru/archive/Sbornik_tezisov_STCIM_2022.pdf.– Дата доступа: 01.05.2026.
19. A contribution to laser cladding of Ti-6Al-4V titanium alloy / Ali S. R. Al-Sayed // Metallurgical Research & Technology.– 2019.– Vol. 116, no. 6.– Art. 634.

20. **Abdelrahim, D. M.** Effect of Molybdenum Contents on Microstructure and High-Temperature Wear Behavior of SiMo Ductile Iron / D. M. Abdelrahim, E. E. Ateia, A. A. Nofal // International Journal of Metalcasting.– 2024.– Vol. 18.– P. 530–545.

21. Ученые РБ и РФ разрабатывают проект в области порошковой металлургии // Российская газета. 09.03.2022.– Режим доступа: https://rg ru/2022/03/09/uchenye-belarusi-i-rossii-razrabatyvaiut-proekt-programmy-v-oblasti-poroshkovoj-metallurgii html.– Дата доступа: 16.04.2026.

22. Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии» (описание направлений работ, в т. ч. защитные покрытия) [Электрон. ресурс].– Режим доступа: https://pminstitute.steelsite ru/.– Дата доступа: 20.04.2026.

23. В Физико-техническом институте НАН открыт участок, где предприятия смогут отрабатывать внедрение новинок // СБ. Беларусь сегодня.– Режим доступа: https://www.sb.by/articles/novatsii-vysokogo-kachestva html.– Дата доступа: 13.04.2026.

24. В производственной кооперации участвуют десятки крупнейших предприятий машиностроения России и Беларуси // Российская газета. 23.01.2025.– Режим доступа: https://rg ru/2025/01/23/v-proizvodstvennoj-kooperacii-uchastvuiut-desiatki-krupnejshih-predpriiatij-mashinostroeniia-rossii-i-belarusi html.– Дата доступа: 09.04.2026.

REFERENCES

1. **Holmberg K., Erdemir A.** Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction,* 2017, vol. 5, pp. 263–284.

2. **Gong L., Fu H., Zhi X.** Corrosion Wear of Hypereutectic High Chromium Cast Iron: A Review. *Metals,* 2023, vol. 13, no. 2, art. 308.

3. **Wang B., Qiu F., Barber G. C.** [et al.]. Microstructure, wear behavior and surface hardening of austempered ductile iron. *Journal of Materials Research and Technology,* 2020, vol. 9, iss. 5. pp. 9838–9855.

4. **Sartwell B. D., Natishan P. M., Singer I. L. [et al.].** *Replacement of Chromium Electroplating Using HVOF Thermal Spray Coatings* [Electronic resource]. Access mode: https://www.nmfrc.org/pdf/other/0152.pdf.pdf (accessed 05.03.2026).

5. *Chromium trioxide widely used in plating and surface treatment.* European Chemicals Agency (ECHA). 8 June 2021 [Electronic resource]. Access mode: https://echa.europa.eu/-/chromium-trioxide-widely-used-in-plating-and-surface-treatment (accessed 27.03.2026).

6. *ECHA Weekly – 11 February 2026.* European Chemicals Agency (ECHA). 11 February 2026 [Electronic resource]. Access mode: https://echa.europa.eu/view-article/-/journal_content/title/echa-weekly-11-february-2026 (accessed 05.03.2026).

7. *UK REACH authorisations for SEA Chromium Trioxide Authorisation Consortium (hard chrome (in-house)), 19 February 2025.* Department for Environment, Food & Rural Affairs (GOV.UK) [Electronic resource]. Access mode: https://www.gov.uk/government/publications/uk-reach-authorisations-for-sea-chromium-trioxide-authorisation-consortium-hard-chrome-in-house-19-february-2025 (accessed: 05.03.2026).

8. *Are HVOF coatings an alternative to hard chrome plating?* TWI [Electronic resource]. Access mode: https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-are-hvof-coatings-an-alternative-to-hard-chrome-plating (accessed: 05.03.2026).

9. **Wu M., Pan L., Duan H.** [et al.]. Study on Wear Resistance and Corrosion Resistance of HVOF Surface Coating Refabricate for Hydraulic Support Column. *Coatings,* 2021, vol. 11, no. 12, art. 1457.

10. **Li G., Gan Y., Liu C.** [et al.]. Corrosion and Wear Resistance of Fe-Based Amorphous Coatings. *Coatings,* 2020, vol. 10, no. 1, art. 73.

11. **Han H., Xiao M., Wang Q.** Corrosion Performance of Fe-Based Amorphous Coatings via Laser Cladding Assisted with Ultrasonic in a Simulated Marine Environment. *Metals,* 2023, vol. 13, no. 12, art. 1938.

12. **Zhou J., Wu J., Tang S.** [et al.]. Review of Laser Texturing Technology for Surface Protection and Functional Regulation of Aluminum Alloys: Wettability, Anti-Icing, Corrosion Resistance, and Wear Resistance. *Coatings,* 2025, vol. 15, no. 5, art. 567.

13. **Sartwell B. D., Legg K. O., Schell J.** [et al.]. *Validation of HVOF WC/Co Thermal Spray Coatings as a Replacement for Hard Chrome Plating on Aircraft Landing Gear. Naval Research Laboratory.* 31 March 2004. [Electronic resource]. Access mode: https://docslib.org/doc/3604927/validation-of-hvof-wc-co-thermal-spray-coatings-as-a-replacement-for-hard-chrome-plating-on-aircraft-landing-gear. (accessed: 15.03.2026).

14. **Singh S., Berndt C. C., Singh Raman R. K.** [et al.]. Applications and Developments of Thermal Spray Coatings for the Iron and Steel Industry. *Materials (Basel),* 2023, vol. 16, no. 2, art. 516.

15. **Reda R., Nofal A. A., Ibrahim K. M.** [et al.]. Microstructure – wear performance relationship of hypoeutectic 15% Cr-2% Mo white iron. *International Journal of Materials Research,* 2012, vol. 103, no. 7, pp. 838–846.

16. **Nofal A., Reda R., Ibrahim K. M.** [et al.]. Structural Refinement of 15%Cr-2%Mo White Irons. *Key Engineering Materials,* 2011, vol. 457, pp. 231–236.

17. **Aly H. A., Nofal A., Hussein A.** [et al.]. Development of Carbidic Austempered Ductile Iron (CADI). Key Engineering Materials, 2020, vol. 835, pp. 163–170.

18. **Nofal A.** ADI – The Material Revolution and Its Novel Metallurgical Advances and Application at CMRDI. *Nauka i tekhnologii modificirovaniya chuguna: tezisy dokladov IV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Science and Technology of Cast Iron Modification: Abstracts of the 4th International Scientific and Technical Conference (STCIM–IV), 25–26 oct. 2022 г.* [Electronic resource]. Access mode: https://stcim modificator ru/archive/Sbornik_tezisov_STCIM_2022.pdf (accessed: 01.05.2026).

19. **Al-Sayed Ali S. R., Hussein A. H. A., Nofal A.** [et al.]. A contribution to laser cladding of Ti-6Al-4V titanium alloy. Metallurgical Research & Technology, 2019, vol. 116, no. 6, art. 634.

20. **Abdelrahim D. M., Ateia E. E., Nofal A. A.** Effect of Molybdenum Contents on Microstructure and High-Temperature Wear Behavior of SiMo Ductile Iron. *International Journal of Metalcasting,* 2024, vol. 18, pp. 530–545.

21. Uchenye RB i RF razrabatyvayut proekt v oblasti poroshkovoj metallurgii [Scientists from Belarus and Russia are developing a project in the field of powder metallurgy]. *Rossijskaya gazeta,* 09.03.2022. Access mode: https://rg ru/2022/03/09/uchenye-belarusi-i-rossii-razrabatyvaiut-proekt-programmy-v-oblasti-poroshkovoj-metallurgii html. (accessed: 16.04.2026).

22. *Gosudarstvennoe nauchnoe uchrezhdenie «Institut poroshkovoj metallurgii» (opisanie napravlenij rabot, v t. ch. zashchitnye pokrytiya)* [State Scientific Institution "Institute of Powder Metallurgy" (description of research areas, including protective coatings)] [Electronic resource]. Access mode: https://pminstitute.steelsite.ru/ (accessed: 20.04.2026).

23. V Fiziko-tekhnicheskom institute NAN otkryt uchastok, gde predpriyatiya smogut otrabatyvat' vnedrenie novinok [A facility has been opened at the Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences where enterprises can test the implementation of innovations]. *SB. Belarus' segodnya*. Access mode: https://www.sb.by/articles/novatsii-vysokogo-kachestva.html (accessed: 13.04.2026).

24. V proizvodstvennoj kooperacii uchastvuyut desyatki krupnejshih predpriyatij mashinostroeniya Rossii i Belarusi [Dozens of major machinery manufacturing enterprises from Russia and Belarus are participating in industrial cooperation]. *Rossijskaya gazeta,* 23.01.2025. Access mode: https://rg.ru/2025/01/23/v-proizvodstvennoj-kooperacii-uchastvuiut-desiatki-krupnejshih-predpriiatij- mashinostroeniia- rossii-i-belarusi html (accessed: 09.04.2026).