



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Сравнительная оценка износостойкости комбинированных покрытий на углеродистых сталях, включающих электролитно-плазменную обработку с последующим осаждением Cr или Co-W

Александр Перков^{1, а, *}, Сергей Силкин^{1, b}, Сергей Кусманов^{2, c}, Иван Тамбовский^{2, d}

¹ Костромской государственный университет, ул. Дзержинского, д. 17, Кострома, 156005, Россия

² Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Вадковский пер., д. 1, г. Москва, 127055, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0002-5265-5186>, sachaperkow@gmail.com; ^b <https://orcid.org/0000-0002-3915-642X>, longamin@mail.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0002-7156-102X>, sakusmanov@yandex.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0002-7633-6059>, ivan.vt@itambovskiy.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.785 : 621.357.7

История статьи:

Поступила: 09 мая 2026

Рецензирование: 25 мая 2026

Принята к печати: 29 июля 2026

Доступно онлайн: 15 сентября 2026

Ключевые слова:

Электролитно-плазменная цементация

Гальванические покрытия

Хромовое покрытие

Покрытие Co-W

Комбинированная обработка

Трение со смазкой

Износостойкость

Углеродистая сталь

Поверхностное упрочнение

Возвратно-поступательное трение

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-20231) Костромскому государственному университету.

АННОТАЦИЯ

Введение. Углеродистые стали 20 и 45 обладают недостаточной износостойкостью в условиях возвратно-поступательного трения, что ограничивает ресурс деталей машин и механизмов. В работе исследована износостойкость поверхности после комбинированной обработки, включающей в себя электролитно-плазменное упрочнение (закалку или цементацию с последующей закалкой) с последующим нанесением гальванических покрытий хрома или сплава Co-W различной толщины. **Методы.** Образцы подвергали электролитно-плазменной цементации (850 °С, 3 мин) или закалке (900 °С) в водных электролитах, после чего на подготовленную поверхность наносили гальванические покрытия Cr (толщиной 1 и 10 мкм) или Co-W (1 и 10 мкм). Износостойкость оценивали методом возвратно-поступательного трения шариком из стали ШХ15 под нагрузкой 10 Н в среде минеральной смазки в течение 1...3 суток с измерением объема износа с помощью профилометрии. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что комбинированная обработка значительно повышает износостойкость по сравнению с отдельными методами упрочнения. На необработанной стали тонкие гальванические покрытия подвергались проламыванию, что приводило к низкой общей износостойкости системы. Электролитно-плазменная закалка стали 45 позволяла улучшить показатели по сравнению с необработанным состоянием, однако наилучшие результаты достигнуты при использовании цементованной стали 20. Увеличение толщины покрытий хрома и Co-W с 1 до 10 мкм приводило к снижению износостойкости. Наиболее высокую износостойкость продемонстрировала система, состоящая из стали 20 после электролитно-плазменной цементации с последующей закалкой и тонкого (1 мкм) хромового покрытия. Полученные результаты могут быть использованы при разработке эффективных технологий упрочнения деталей (валы, направляющие, элементы гидроцилиндров), работающих в условиях трения со смазкой, с возможностью сохранения относительно мягкой сердцевины детали.

Для цитирования: Сравнительная оценка износостойкости комбинированных покрытий на углеродистых сталях, включающих электролитно-плазменную обработку с последующим осаждением Cr или Co-W / А.С. Перков, С.А. Силкин, С.А. Кусманов, И.В. Тамбовский // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 3. – С. 129–146. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.3-129-146.

Введение

Углеродистые конструкционные стали 20 и 45 широко применяются в машиностроении для изготовления деталей, работающих в условиях трения (валы, шестерни, направляющие,

элементы гидроцилиндров и др.), благодаря хорошей технологичности, невысокой стоимости и удовлетворительным механическим свойствам, а также широким возможностям по термообработке [1]. Однако их низкая поверхностная твердость без термообработки и недостаточная износостойкость в условиях возвратно-поступательного трения существенно ограничивают ресурс работы узлов трения и требуют применения эффективных методов поверхностного упрочнения [2, 3].

*Адрес для переписки

Перков Александр Сергеевич, аспирант

Костромской государственной университету,

ул. Дзержинского, д. 17,

156005, Кострома, Россия

Тел.: +7 910 808-41-87, e-mail: sachaperkow@gmail.com

Традиционные методы повышения износостойкости включают в себя химико-термическую обработку (цементацию, азотирование) [4], объемную или поверхностную закалку [5], а также нанесение гальванических защитных покрытий [6, 7]. Среди диффузионных методов особое место занимают методы электролитно-плазменной обработки (ЭПО) [8], которые позволяют проводить локальное насыщение поверхности углеродом (цементацию) или азотом (нитроцементацию) с одновременной закалкой в одном технологическом цикле [8, 9]. ЭПО отличается высокой скоростью нагрева и охлаждения, низким энергопотреблением, экологической безопасностью и возможностью обработки сложнопрофильных деталей. Многочисленные исследования подтверждают, что ЭПО значительно повышает микротвердость и износостойкость низко- и среднеуглеродистых сталей за счет формирования мартенситной структуры и дисперсных карбонитридов [8, 9].

Наряду с диффузионными методами широко применяются гальванические покрытия, в частности твердое хромирование [6, 7]. Твердые хромовые покрытия обеспечивают высокую микротвердость (800...1200 HV), низкий коэффициент трения, отличную износостойкость в условиях абразивного и адгезионного изнашивания благодаря образованию микротрещин, способных удерживать смазку [6, 7], и высокую коррозионную стойкость [10, 11]. Однако при увеличении толщины покрытия (свыше 10...20 мкм) в нем накапливаются значительные внутренние напряжения, что приводит к растрескиванию, снижению адгезии и уменьшению износостойкости, особенно на мягкой подложке [12–14]. Альтернативой хромированию выступают гальванические покрытия сплавов металлов подгруппы железа с вольфрамом (например, Co-W), которые обладают сопоставимой или превосходящей микротвердостью, высокими трибологическими характеристиками и считаются более экологически приемлемыми ввиду отсутствия шестивалентного хрома [15, 16].

Особенно перспективными являются комбинированные (дуплексные) технологии, сочетающие предварительное упрочнение подложки с последующим нанесением защитного покрытия. Такие подходы позволяют одновременно повысить твердость, износостойкость

и коррозионную стойкость поверхности при сохранении необходимых свойств сердцевины детали. В литературе активно обсуждаются различные варианты дуплексных систем для сталей. В частности, значительное внимание уделяется сочетаниям плазменного азотирования с PVD-покрытиями (например, CrN), а также комбинациям традиционных диффузионных методов упрочнения с покрытиями, полученными методами физического и химического осаждения из паровой фазы [17–20].

Однако, несмотря на большое количество исследований, посвященных отдельным методам поверхностного упрочнения и дуплексным технологиям, комплексные работы, в которых последовательно применяются электролитно-плазменная обработка и гальваническое осаждение покрытий на углеродистых сталях, практически отсутствуют. Современные обзорные работы по износостойким покрытиям и гибридным методам упрочнения в основном рассматривают сочетания плазменного азотирования с PVD- и CVD-покрытиями, а также другие комбинации термохимической обработки [20]. Даже специализированные обзоры по электролитно-плазменной обработке не затрагивают последующее гальваническое осаждение упрочняющих покрытий [21]. Аналогично в экспериментальных исследованиях различных дуплексных систем (плазменное азотирование + PVD [22, 23], цементация + азотирование [24] и др.) комбинация электролитно-плазменного упрочнения с гальваническим осаждением хромовых покрытий или покрытий на основе сплавов кобальта не рассматривается. Это свидетельствует о наличии пробела в исследованиях и определяет актуальность настоящей работы.

В отличие от предыдущей работы авторов [25], выполненной в условиях сухого трения, в настоящем исследовании впервые проведено систематическое сравнение износостойкости различных комбинаций электролитно-плазменного упрочнения подложки и гальванических покрытий (Cr и Co-W) в условиях возвратно-поступательного трения со смазкой. Такой режим трения значительно ближе к реальным условиям эксплуатации деталей машин и механизмов (валы, направляющие, элементы гидроцилиндров и др.).

Цель настоящей работы – изучение износостойкости комбинированных упрочняющих

покрытий на стали 20 и стали 45, полученных электролитно-плазменной цементацией или закалкой с последующим гальваническим нанесением Cr или сплава Co-W, а также установление оптимальных сочетаний «подложка – покрытие» для получения максимальной износостойкости в условиях трения в смазке.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие *задачи*.

1. Изучить износостойкость углеродистых сталей 20 и 45 после электролитно-плазменной обработки (закалки и цементации с последующей закалкой) без нанесения гальванических покрытий в условиях возвратно-поступательного трения со смазкой.

2. Установить влияние материала подложки (необработанная сталь, ЭП-закаленная сталь, цементованная сталь) на износостойкость комбинированных систем.

3. Установить влияние толщины и типа гальванических покрытий (хрома и сплава Co-W) на износостойкость комбинированных систем.

4. Определить оптимальные сочетания метода упрочнения подложки и параметров гальванического осаждения (тип и толщина покрытия) для достижения максимальной износостойкости комбинированных покрытий в условиях возвратно-поступательного трения со смазкой.

Методика исследований

Материалы

Объект исследования: углеродистые стали 20 и 45. Образцами выступали параллелепипеды $6 \times 6 \times 15$ мм.

Данные марки стали были выбраны для различных методик электролитно-плазменной обработки. Сталь 45 способна к закаливанию без предварительного насыщения, тогда как стали 20 требуется насыщение углеродом для закалки поверхности. Использование двух марок стали позволяет провести испытания как закаливания без насыщения, так и поверхностного закаливания.

Поверх обработанной ЭПО поверхности наносилось гальваническое покрытие из хрома или сплава Co-W. У полученных комбинированных покрытий изучалась микротвердость (HV) и износостойкость по методу возвратно-поступательного трения. Все комбинации материалов

и методов обработки данной работы представлены в табл. 1.

Электролитно-плазменная обработка

Электролитно-плазменная обработка проводилась на установке собственного изготовления.

Состав электролита для проведения цементации с последующей закалкой (масс. %): 10 % глицерина, 10 % хлорида аммония, остальное дистиллированная вода. Цементация проводилась при напряжении обработки 200...220 В, температуре образца 850 °С в электролите температурой 15...20 °С в течение 3 минут, что позволяло получить толщину упрочненного слоя ~50 микрон [21]. После насыщения проводилась закалка в этом же электролите путем отключения подачи тока.

Электролитно-плазменная обработка без насыщения (закалка) проводилась при напряжении обработки 200...220 В, температуре образца 900 °С в электролите температурой 15...20 °С. Состав электролита (масс. %): 15 % хлорида аммония, остальное вода. После достижения температуры образца 900 °С и выдержки 30 секунд проводилась закалка в этом же электролите путем отключения подачи тока.

После ЭПО образцы подвергались минимальной механической обработке для удаления оксидных слоев и подготовки к нанесению гальванического покрытия (наждачная бумага зернистостью P2000). Все образцы доводились до шероховатости поверхности по $Ra = 0,15$ мкм (± 10 %).

Гальваническое осаждение

Для электрохимического осаждения хрома использовался стандартный электролит хромирования ($\text{CrO}_3 - 250$ г/л, $\text{H}_2\text{SO}_4 - 2,5$ г/л) при температуре 55 °С и плотности тока 50 А/дм². Время хромирования подбиралось исходя из необходимой толщины покрытия.

Перед хромированием поверхность обезжиривалась, далее следовала 60-секундная выдержка в электролите без тока, затем 15-секундная анодная активация в этом же электролите при плотности тока 250 мА/см² [26].

Гальванические покрытия Co-W осаждались из цитратного электролита следующего состава [27]: вольфрамат натрия ($\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) –

Таблица 1

Table 1

Сводная таблица комбинаций материалов и методов обработки, исследуемых в данной работе

Summary table of materials and surface treatment combinations investigated in this study

Сталь 20 / 0.2% C steel	–	–
Сталь 20 / 0.2% C steel	–	Cr
Сталь 20 / 0.2% C steel	–	Co-W
Сталь 20 / 0.2% C steel	Цементация / Carburizing	–
Сталь 45 / 0.45% C steel	Закалка / Quenching	–
Сталь 45 / 0.45% C steel	Закалка / Quenching	Cr
Сталь 45 / 0.45% C steel	Закалка / Quenching	Co-W
Сталь 20 / 0.2% C steel	Цементация / Carburizing	Cr
Сталь 20 / 0.2% C steel	Цементация / Carburizing	Co-W
Сталь 20 / 0.2% C steel	–	–

0,2 моль/л; сульфат кобальта ($\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) – 0,2 моль/л; лимонная кислота ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) – 0,04 моль/л; цитрат натрия ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$) – 0,25 моль/л; борная кислота (H_3BO_3) – 0,65 моль/л; pH электролита перед осаждением составлял 6,7.

Осаждение проводилось при температуре электролита 80 °C и плотности тока 20 мА/см². Время осаждения подбиралось исходя из необходимой толщины покрытия.

Гальванические покрытия наносились толщиной 1 мкм (для оценки межслойной износостойкости) и толщиной 10 мкм (для оценки износостойкости исключительно гальванического покрытия). Толщина гальванических покрытий рассчитывалась исходя из скорости осаждения, определенной по выходу по току, плотности и состава сплава Co-W, полученных в предыдущих работах [15] и данных из литературы [25, 28–30].

Верификация толщин обоих типов гальванических покрытий происходила по анализу шлифов после осаждения на сталь 20. Шлиф подвергался травлению (ниталь) в течение 60 секунд.

Трибологические испытания

Изучение износостойкости осуществлялось методом возвратно-поступательного трения на установке собственного изготовления (система трения «шар – поверхность»). Метод заключается в трении контртелом в виде шарика диаметром 6,35 мм из стали ШХ15 (854 ± 8 HV) по поверхности покрытия под нагрузкой 10 Н. Такая нагрузка была выбрана вследствие низкой нагрузки при трении реальных деталей в механиз-

мах в среде смазки (например, шток-линейный подшипник). Однако при нагрузках менее 10 Н время проведения трибологических испытаний многократно возрастает и не позволяет провести изучение широкой серии образцов.

Контртело перед трением не претерпевало механической обработки; для каждого испытания использовалось новое. Скорость движения образца относительно контртела – 96 двойных ходов в минуту, путь трения – 1 мм, что в пересчете на линейную скорость составляет 0,192 м/мин. Трение проводилось в среде минеральной смазки (MANNOL 8029 LC-2) при температуре 25 °C.

Время трибологических испытаний составляло 1, 2, 3 суток для каждого образца. Оценивалась динамика износа при различной длительности трения (1, 2, 3 суток). Для каждой комбинации материала и времени трения использовалось три параллельных образца для проверки воспроизводимости.

Оценка износостойкости велась путем измерения площади износа по данным профилометрии с дальнейшим пересчетом на объем износа с учетом длины дорожки. Для профилометрических измерений использован профилометр Mitutoyo Surftest SJ-410.

Помимо изучения износостойкости комбинированного покрытия, износостойкость изучалась и у отдельно взятых вариантов обработки поверхности, а также на необработанной стали.

После проведения трибологических испытаний на дорожках износа определяли элементный состав и распределение элементов в различ-

ных зонах износа. Определение велось методом энергодисперсионного рентгеновского анализа (EDX) с использованием детектора X-Act (Oxford Instruments, Великобритания), установленного на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 (Tescan, Чехия). Анализ проводили при ускоряющем напряжении 20 кВ.

Микротвердость

Для анализа механизмов изнашивания комбинированных покрытий было проведено измерение микротвердости подложек и гальванических покрытий. Микротвердость измеряли на микротвердомере Falcon 503 (Innovatest, Нидерланды) по методу Виккерса при нагрузке 20 г и времени выдержки нагрузки 10 с. Для каждого материала выполняли не менее пяти измерений с последующим усреднением результатов.

Результаты и их обсуждение

Результаты измерения толщин гальванических покрытий (рис. 1) доказывают правильность расчета времени осаждения для получения покрытий заданных толщин (1 и 10 мкм, в пределах погрешности измерений 20 %). Выбранное время осаждения поддерживалось во всех последующих экспериментах по осаждению на различные подложки.

На рис. 2 изображены профилограммы (а) и величина объемного износа (б) подложек, используемых для нанесения гальванических покрытий: необработанная сталь 20, цементованная сталь 20 и закаленная ЭПО сталь 45. Видно, что обработанные стали имеют значительно меньший износ. Причем поверхность после цементации показывает меньший износ, чем после закалки.

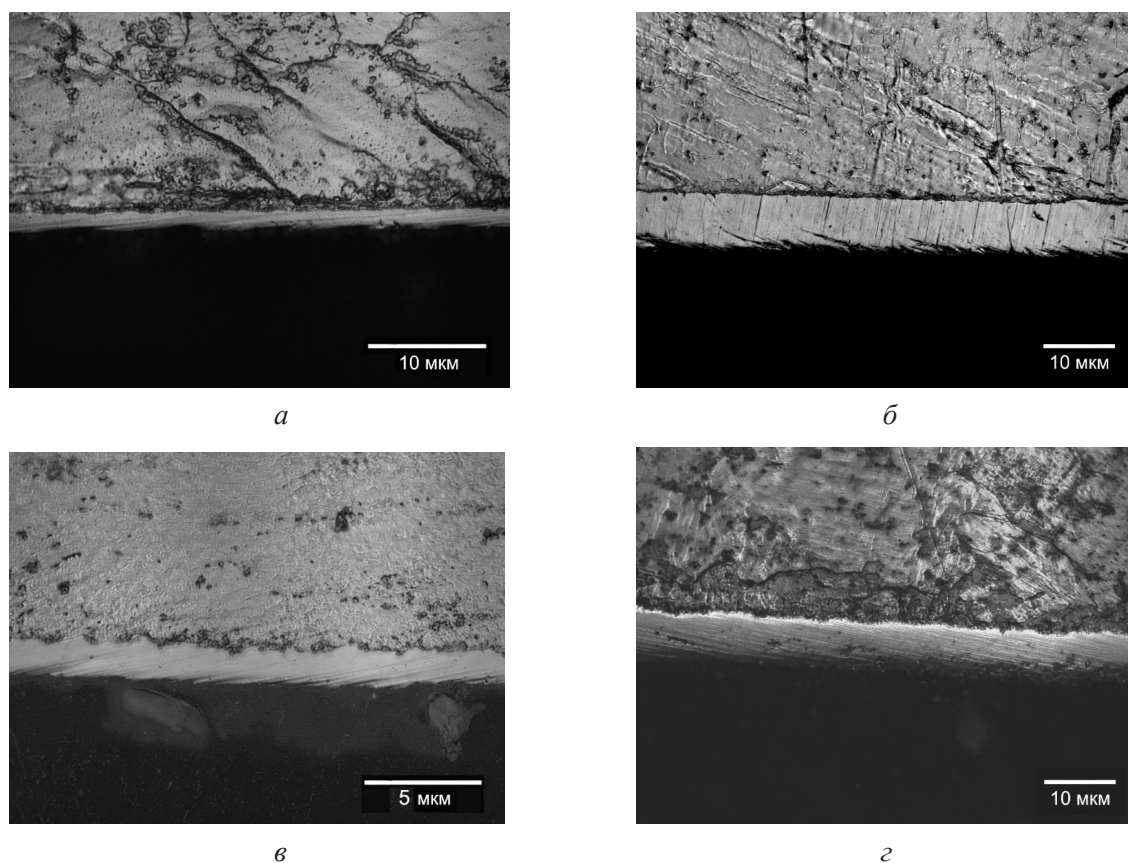


Рис. 1. Микрофотографии шлифов поперечных сечений гальванических покрытий Cr и Co-W, осажденных на стальную подложку после травления:

а – покрытие Co-W толщиной 1 мкм; б – покрытие Co-W толщиной 10 мкм, в – покрытие Cr толщиной 1 мкм, з – покрытие Cr толщиной 10 мкм

Fig. 1. Microphotographs of cross-sectional polished sections of galvanic Cr and Co-W coatings deposited on a steel substrate after etching:

а – Co-W coating with a thickness of 1 μm; б – Co-W coating with a thickness of 10 μm; в – Cr coating with a thickness of 1 μm; з – Cr coating with a thickness of 10 μm

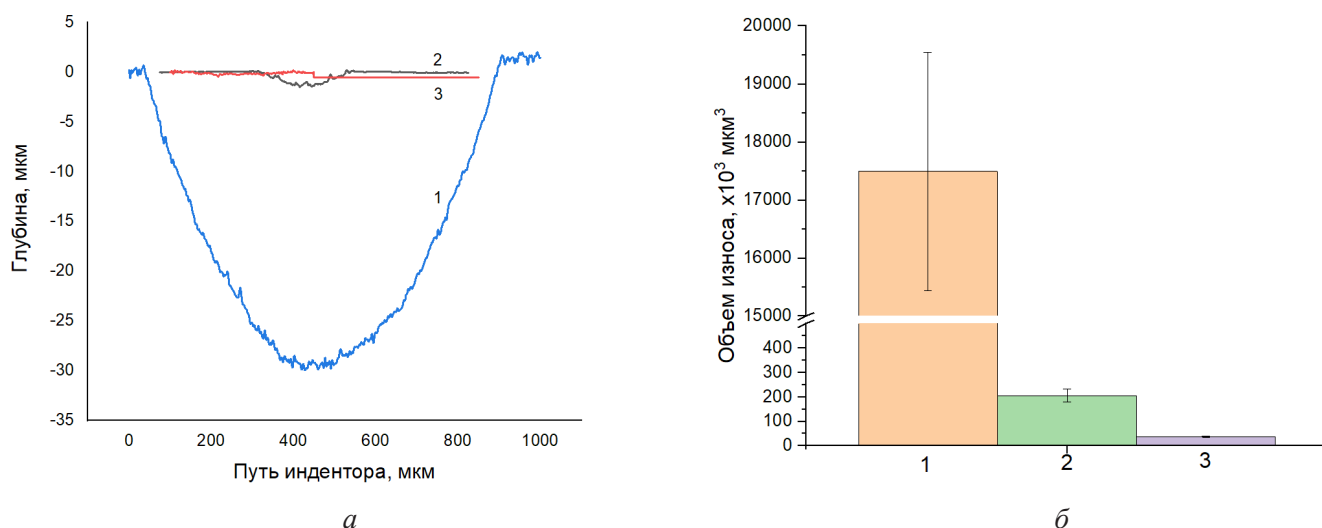


Рис. 2. Результаты трибологических испытаний стали 20 после электролитно-плазменной закалки, цементации (с последующей закалкой) в сравнении с необработанной сталью 20:

a – примеры профилограмм дорожек трения (один из серии образцов); *б* – величины объемного износа; 1 – сталь 20 необработанная; 2 – сталь 20 после цементации, 3 – сталь 45 после ЭП-закалки

Fig. 2. Results of tribological tests of 0.2% C steel after electrolytic-plasma quenching, carburizing (with subsequent quenching) in comparison with untreated 0.2% C steel:

a – examples of friction track profilograms (one representative sample from the series); *б* – volumetric wear values; 1 – untreated 0.2% C steel; 2 – carburized 0.2% C steel; 3 – electrolytic-plasma quenched 0.45% C steel

Анализ износостойкости гальванических покрытий толщиной 10 мкм (рис. 3) показывает, что хром является более износостойким покрытием по сравнению с Co-W. Это противоречит ранним исследованиям [25], в которых в условиях сухого трения покрытие Co-W демонстриро-

вало большую износостойкость, чем Cr. Эффект высокой износостойкости хромовых покрытий в среде смазки объясняется по-разному. Одни авторы связывают это с трещиноватостью покрытия, где трещины выступают как каналы подачи смазки в зону контакта [30, 31], другие

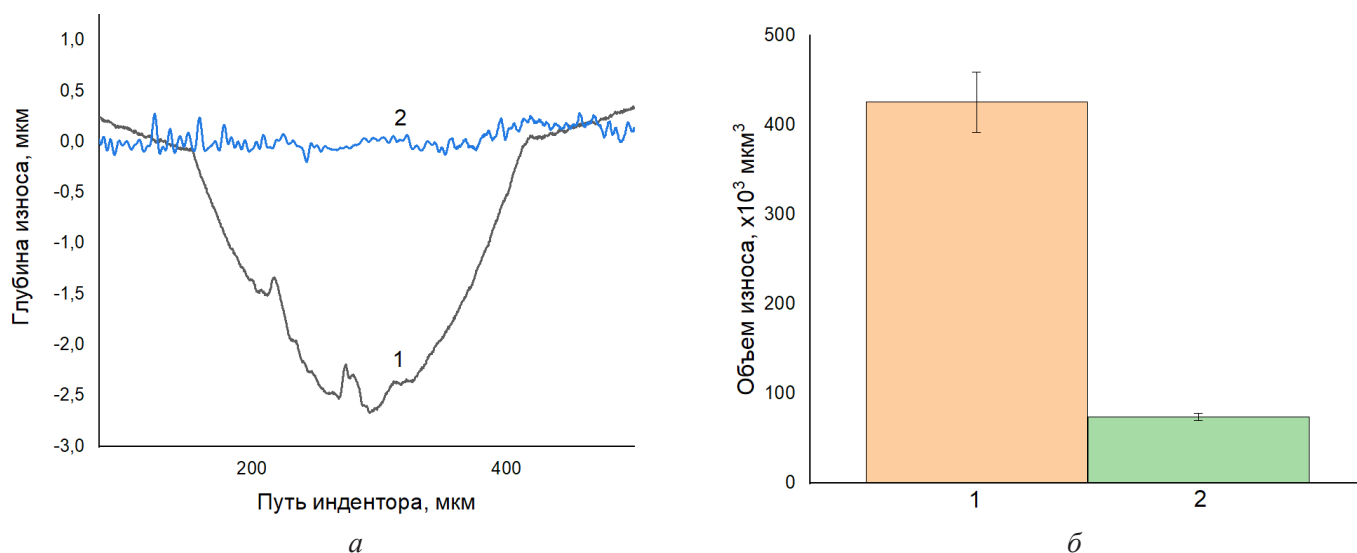


Рис. 3. Результаты трибологических испытаний гальванических покрытий Cr и Co-W:

a – примеры профилограмм дорожек трения (один из серии образцов); *б* – величины объемного износа; 1 – гальваническое покрытие Co-W (10 мкм); 2 – гальваническое покрытие Cr (10 мкм)

Fig. 3. Results of tribological tests of Cr and Co-W electrodeposited coatings:

a – examples of friction track profilograms (one representative sample from the series); *б* – volumetric wear values; 1 – Co-W electrodeposited coating (10 μ m); 2 – Cr electrodeposited coating (10 μ m)

отрицают влияние трещин и связывают эффект с высокой смачиваемостью поверхности хрома в процессе изнашивания [32].

В целом процесс изнашивания комбинированного упрочняющего покрытия можно разделить на три фазы.

1. Изнашивание гальванического покрытия (без влияния подложки).

2. Изнашивание тонкой части гальванического покрытия вблизи границы с подложкой и переход износа в подложку. При мягкой подложке здесь возможен пролом и разрушение гальванического покрытия (рис. 4)

3. Изнашивание подложки с участием абразивных частиц разрушенного гальванического покрытия. Это видно по EDX-анализу дорожек трения (рис. 5). Наблюдается, что частицы по-

крытия остаются в дорожке трения, несмотря на то что глубина дорожек сильно превышает толщину покрытия.

Изучение влияния материала подложки на примере осаждения Co-W толщиной 1 мкм представлено на рис. 6. Системы с модифицированной стальной подложкой демонстрируют повышенную износостойкость по сравнению с немодифицированной. Использование гальванического покрытия без упрочнения подложки не приводит к существенному увеличению износостойкости системы. Увеличение толщины покрытия не является решением данной проблемы, так как при его изнашивании и утончении износ будет происходить интенсивно, как изображено на рис. 5, и аналогично приводить к проломам самого покрытия (рис. 3).

Очевидно, что большую роль в износостойкости системы играет адгезия гальванического покрытия. Косвенно качество адгезии покрытия определялось по визуальному анализу следа износа и анализа фотографий шлифа комбинированного покрытия (рис. 1). При отламывании покрытия от поверхности подложки вокруг дорожки трения образуются отломы (рис. 3). Они возникают всегда при трении гальванического покрытия, осажденного на необработанную сталь, а также в случаях некачественной подготовки поверхности перед гальваническим осаждением даже на обработанную сталь, что приводит в конечном итоге к высокому значению износа.

При сравнении методов упрочнения подложек видно, что система «покрытие Co-W толщиной 1 мкм на подложке, закаленной ЭПО» обладает наименьшей износостойкостью: ее износ выше, чем у аналогичного покрытия, осаж-

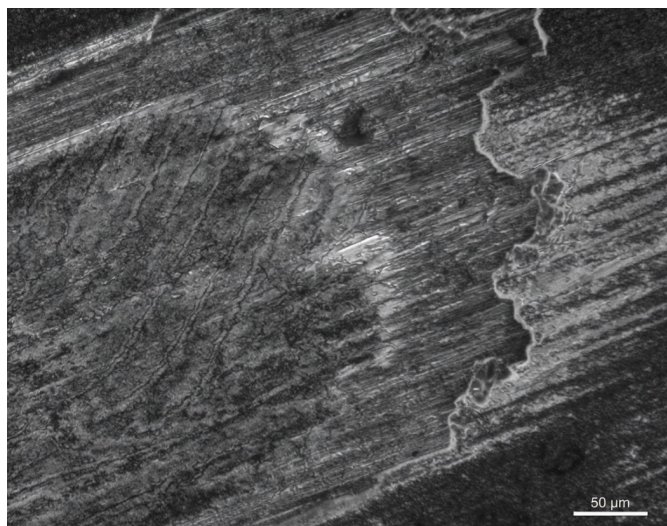


Рис. 4. Отломы покрытия Co-W на мягкой подложке после трения

Fig. 4. Co-W coating delamination on a soft substrate after friction

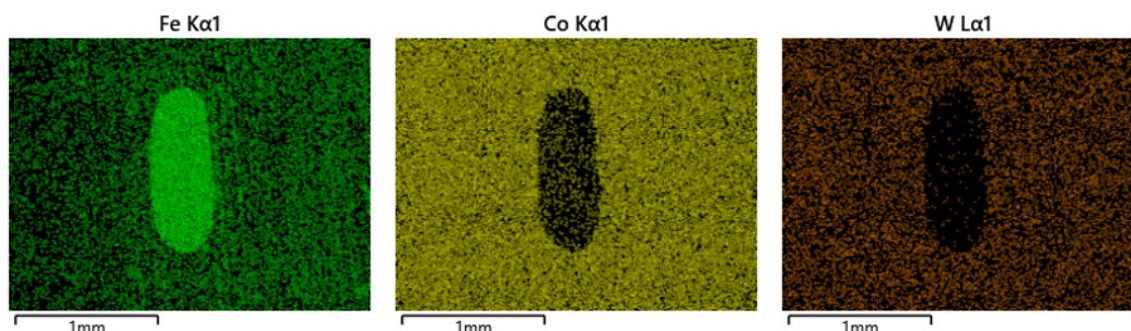


Рис. 5. EDX-анализ дорожки трения комбинированного покрытия. Ускоряющее напряжение 20 кэВ

Fig. 5. EDX analysis of the friction track of the combined coating. Accelerating voltage: 20 keV

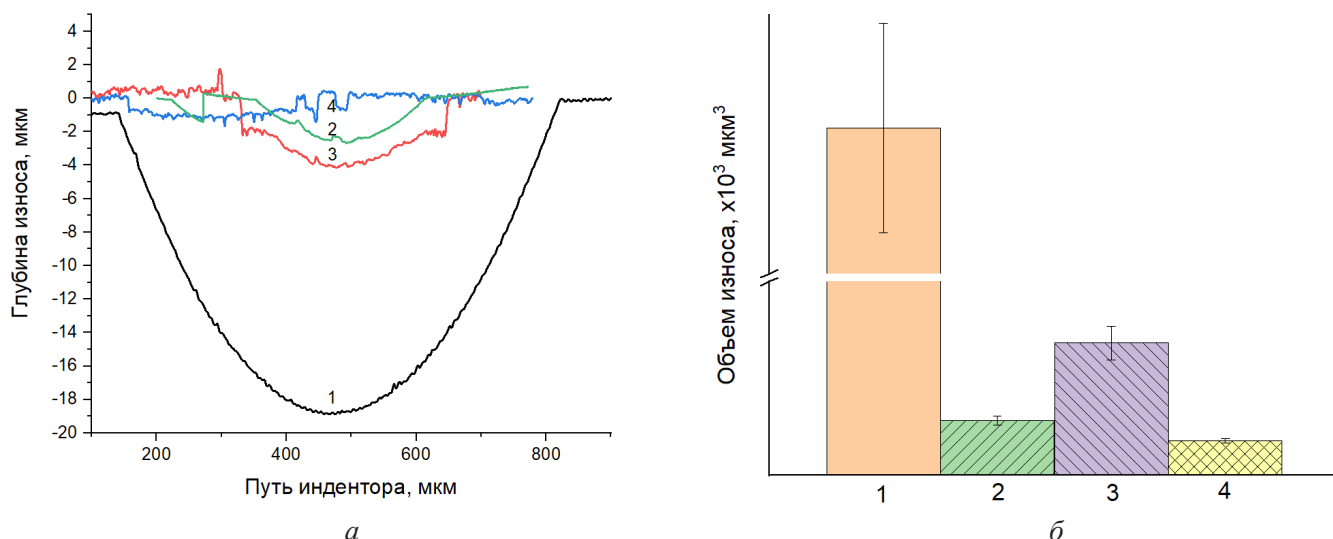


Рис. 6. Результаты трибологических испытаний покрытий Co-W, осажденных на различные подложки: а – примеры профилограмм дорожек трения (один из серии образцов); б – величины объемного износа; 1 – покрытие Co-W (1 мкм), нанесенное на необработанную сталь; 2 – покрытие Co-W (10 мкм); 3 – покрытие Co-W (1 мкм), нанесенное на сталь 45 после ЭП-закалки, 4 – покрытие Co-W (1 мкм), нанесенное на сталь 20 после цементации

Fig. 6. Results of tribological tests of Co-W coatings deposited on various substrates:

а – examples of friction track profilograms (one representative sample from the series); б – volumetric wear values: 1 – Co-W coating (1 μ m) deposited on untreated steel; 2 – Co-W coating (10 μ m); 3 – Co-W coating (1 μ m) deposited on 0.45% C steel after electrolytic-plasma quenching; 4 – Co-W coating (1 μ m) deposited on 0.2% C steel after carburizing

денного на цементованную с последующей закалкой сталь, и выше, чем у покрытия Co-W толщиной 10 мкм, осажденного без предварительного упрочнения подложки. Самая высокая износостойкость наблюдается при комбинации осаждения Co-W-покрытия на подложку после цементации с последующей закалкой. Износостойкость в этом случае даже выше, чем непосредственно Co-W-покрытия, несмотря на то что в обоих случаях трение испытывается по одному и тому же гальваническому сплаву. Разницу в трибологическом поведении Co-W при толщине 1 и 10 мкм гипотетически можно объяснить по аналогии с хромовыми покрытиями – повышением внутренних напряжений в результате увеличения толщины при осаждении [12–14], но для Co-W требуется проведение дополнительного исследования. Это также позволяет сделать вывод о нецелесообразности замены комбинированного упрочнения увеличением толщины гальванического покрытия.

Аналогичная закономерность наблюдается при сравнении влияния материала подложки комбинированного покрытия в сочетании с гальваническим хромированием. В целом все хромовые покрытия имеют низкий износ, который едва заметен лишь по изменению шероховатости

покрытия в месте контакта с контртелом (рис. 7). Видно также, что тонкое хромовое покрытие (1 мкм) на цементованной подложке имеет большую износостойкость, чем толстое (10 мкм). Несмотря на то что износу в обоих случаях подвергалось хромовое покрытие, полученное при одинаковых режимах электроосаждения, менее толстое покрытие с меньшим количеством напряжений [12–14] обладает повышенной износостойкостью.

Элементный анализ поверхности после износа был проведен для трех видов обработки: хром, осажденный на необработанную сталь 20; хром, осажденный на закаленную ЭПО сталь 45; Co-W, осажденный на закаленную ЭПО сталь 45. Все гальванические покрытия толщиной 1 мкм. Анализ проводился в трех зонах: поверхность гальванического покрытия, не подвергнутая трению; зона на границе дорожки трения; зона в центре дорожки трения.

Анализ показал (рис. 8–10), что на поверхности, не подвергнутой трению, наблюдаются в основном элементы гальванического покрытия и небольшое содержание атомов железа, связанное с глубиной проникновения излучения. Внутри дорожек трения наблюдаются в основном атомы железа подложки с небольшим содержа-

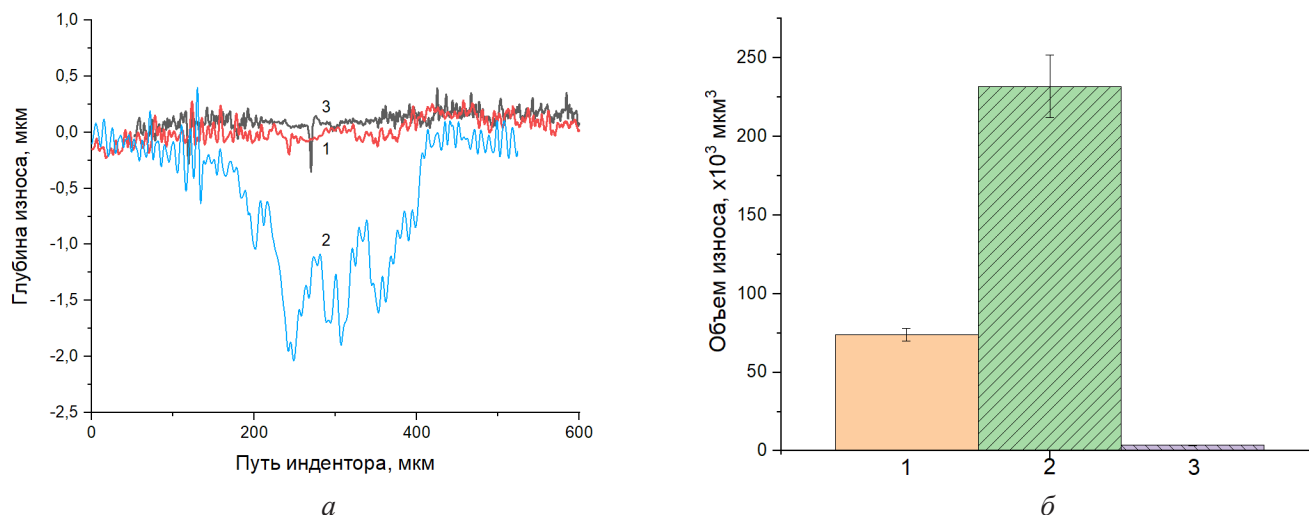


Рис. 7. Результаты трибологических испытаний покрытий Cr, осажденных на различные подложки:
а – примеры профилограмм дорожек трения (один из серии образцов); *б* – величины объемного износа; 1 – гальваническое покрытие Cr (10 мкм); 2 – гальваническое покрытие Cr (1 мкм), нанесенное на сталь 45 после ЭП-закалки; 3 – гальваническое покрытие Cr (1 мкм), нанесенное на сталь 20 после цементации

Fig. 7. Results of tribological tests of Cr coatings deposited on various substrates:
а – examples of friction track profilograms (one representative sample from the series); *б* – volumetric wear values; 1 – Cr galvanic coating (10 μm); 2 – Cr galvanic coating (1 μm) deposited on 0.45% C steel after electrolytic-plasma quenching; 3 – Cr galvanic coating (1 μm) deposited on 0.2% C steel after carburizing

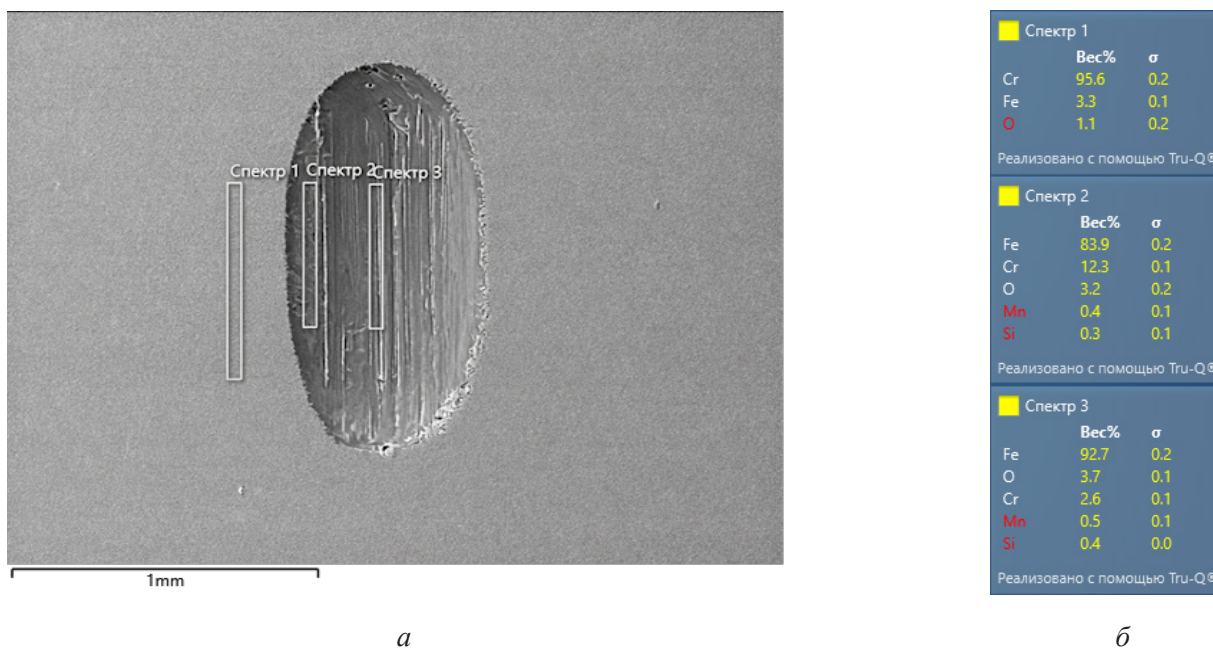


Рис. 8. EDX-анализ дорожки трения хромового покрытия, осажденного на подложку из необработанной стали 20:

а – SEM-изображение дорожки трения с отмеченными зонами EDX-анализа, *б* – состав поверхности исследуемых зон (масс. %)

Fig. 8. EDX analysis of the friction track of a chromium coating deposited on an untreated 0.2% C steel substrate:

а – SEM image of the friction track with marked EDX analysis zones; *б* – surface composition of the investigated zones (wt. %)

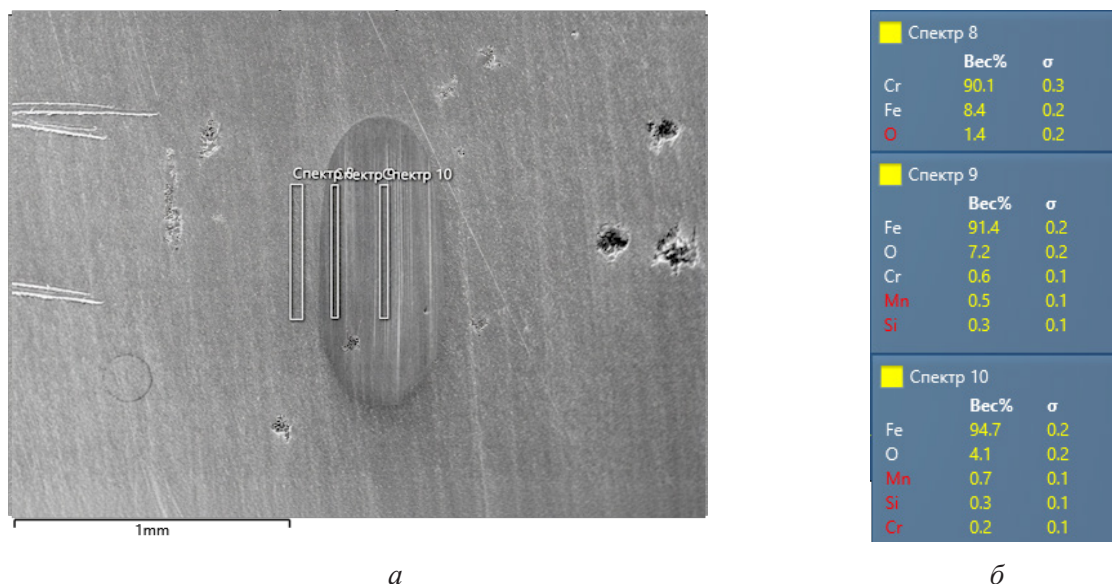


Рис. 9. EDX-анализ дорожки трения хромового покрытия, осажденного на подложку из закаленной ЭПО стали 45:

a – SEM-изображение дорожки трения с отмеченными зонами EDX-анализа, *б* – состав поверхности исследуемых зон (масс. %)

Fig. 9. EDX analysis of the friction track of a chromium coating deposited on electrolytic-plasma quenched 0.45% C steel substrate:

a – SEM image of the friction track with marked EDX analysis zones; *б* – surface composition of the investigated zones (wt. %)

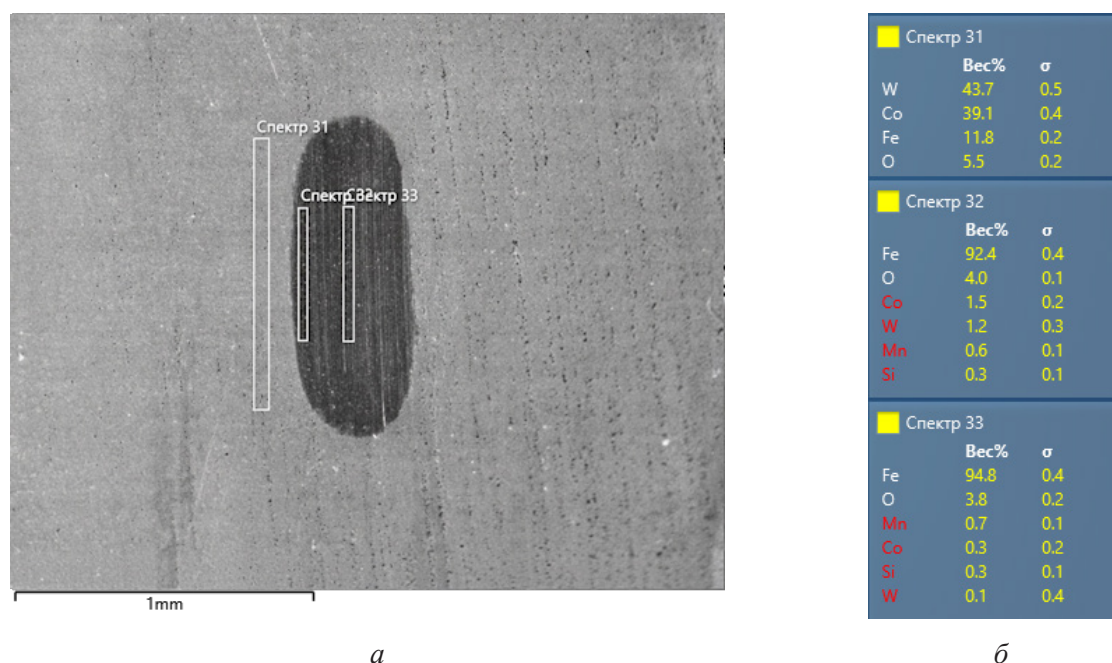


Рис. 10. EDX-анализ дорожки трения покрытия Co-W, осажденного на подложку из закаленной ЭПО стали 45:

a – SEM-изображение дорожки трения с отмеченными зонами EDX-анализа; *б* – состав поверхности исследуемых зон (масс. %)

Fig. 10. EDX analysis of the friction track of a Co-W coating deposited on electrolytic-plasma quenched 0.45% C steel substrate:

a – SEM image of the friction track with marked EDX analysis zones; *б* – surface composition of the investigated zones (wt. %)

нием элементов гальванических покрытий, что говорит о наличии частиц, участвующих в трении подложки после износа гальванического покрытия.

При сравнении изучаемых гальванических покрытий (Co-W, Cr) наибольшая износостойкость наблюдалась в случае нанесения тонких покрытий на цементованную сталь 20. На рис. 11 видно, что наименьший износ наблюдается при комбинации стали 20 после цементации именно с хромовым покрытием.

Исходя из полученных данных, можно сказать, что на необработанной стали доминирующим механизмом изнашивания является абразивный износ, инициируемый проломом (деламинацией) гальванического покрытия. Тонкое покрытие (1 мкм) не способно сопротивляться контактному напряжению на мягкой подложке, что приводит к его быстрому разрушению. Образующиеся при этом твердые частицы покрытия (Co-W или Cr) участвуют в дальнейшем изнашивании по абразивному механизму. Это подтверждается наличием элементов покрытия в зоне трения даже при значительной глубине износа (рис. 4).

На упрочненных подложках (цементованная сталь 20 и ЭП-закаленная сталь 45) механизм изнашивания существенно изменяется. Твердая диффузионная подложка предотвращает ранний пролом покрытия, и изнашивание в течение длительного времени происходит преимущественно внутри самого гальванического слоя. При этом с увеличением толщины покрытия возрастает роль усталостного изнашивания, связанного, вероятно, с накоплением внутренних напряжений и последующим растрескиванием, а также отслаиванием покрытия.

Результаты трибологических испытаний комбинаций методов упрочнения и отдельных методов упрочнения при различной длительности трения представлены в табл. 2.

Для объяснения наблюдаемых различий в износостойкости комбинированных покрытий были проведены измерения микротвердости исходных подложек и гальванических покрытий (табл. 3).

Полученные данные позволяют объяснить различия в поведении покрытий с позиций механики контактного взаимодействия. На необработанных сталях 20 и 45 (микротвердость 217...228 HV)

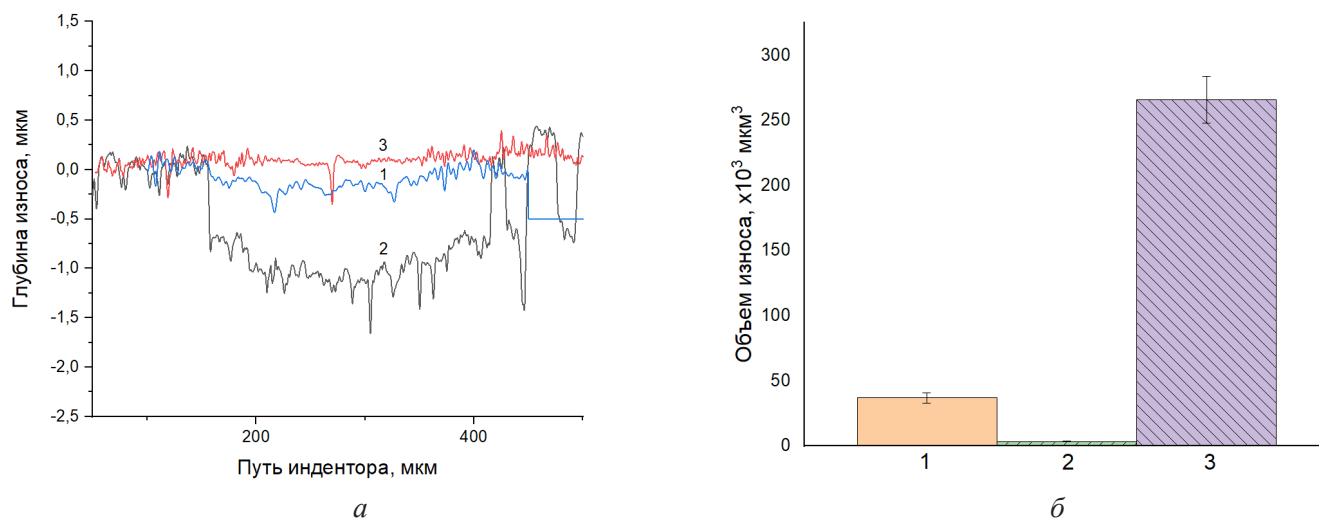


Рис. 11. Результаты трибологических испытаний покрытий Cr и Co-W толщиной 1 мкм, осажденных на подложку из цементованной (с последующей закалкой) стали 20 в сравнении подложкой без покрытий: а – примеры профилограмм дорожек трения (один из серии образцов); б – величины объемного износа; 1 – сталь 20 после цементации без гальванического покрытия; 2 – гальваническое покрытие Co-W, нанесенное на сталь 20 после цементации; 3 – гальваническое покрытие хрома, нанесенное на сталь 20 после цементации

Fig. 11. Results of tribological tests of 1 μ m thick Cr and Co-W coatings deposited on a carburized (followed by quenching) 0.2% C steel substrate in comparison with the uncoated substrate:

а – examples of friction track profilograms (one representative sample from the series); б – volumetric wear values; 1 – 0.2% C steel after carburizing without a galvanic coating; 2 – Co-W galvanic coating deposited on carburized 0.2% C steel; 3 – chromium galvanic coating deposited on carburized 0.2% C steel

Таблица 2

Table 2

**Результаты трибологических испытаний комбинаций способов упрочнения подложки
и гальванических покрытий**

Tribological test results of combinations of substrate hardening methods and galvanic coatings

Подложка / Substrate	Покрытие / Coating	Длительность трения, сутки / Friction duration (days)		
		1	2	3
		Средний объем износа, $\times 10^3$ мкм ³ / Mean wear volume ($\times 10^3$ μm^3)		
–	Co-W (10 мкм) / Co-W (10 μm)	335	426	430
–	Cr (10 мкм) / Cr (10 μm)	48	74	63
Сталь 45 (закалка ЭПО) / 0.45% C steel (EPT quenching)	Без покрытия / Uncoated	156	205	467
Сталь 45 (закалка ЭПО) / 0.45% C steel (EPT quenching)	Co-W (1 мкм) / Co-W (1 μm)	804	1025	0
Сталь 45 (закалка ЭПО) / 0.45% C steel (EPT quenching)	Cr (1 мкм) / Cr (1 μm)	129	232	0
Сталь 20 (необработанная) / 0.2% C steel (untreated)	Без покрытия / Uncoated	12 578	17 495	23 020
Сталь 20 (необработанная) / 0.2% C steel (untreated)	Co-W (1 мкм) / Co-W (1 μm)	6334	8127	0
Сталь 20 (цементация) / 0.2% C steel (carburized)	Без покрытия / Uncoated	–	37	44
Сталь 20 (цементация) / 0.2% C steel (carburized)	Co-W (1 мкм) / Co-W (1 μm)	–	266	271
Сталь 20 (цементация) / 0.2% C steel (carburized)	Cr (1 мкм) / Cr (1 μm)	1	3,5	8

Таблица 3

Table 3

**Результаты измерения микротвердости всех материалов подложек и гальванических
покрытий**

Microhardness measurement results of substrate materials and galvanic coatings

Материал / Material	Нагрузка, г / Load (g)	
	20	
	Микротвердость, HV / Microhardness (HV)	Погрешность / Error
Сталь 20 (необработанная) / 0.2% C steel (untreated)	20	228
Сталь 45 (необработанная) / 0.45% C steel (untreated)	20	217
Сталь 45 (закалка ЭПО) / 0.45% C steel (EPT quenching)	20	1178
Сталь 20 (цементация) / 0.2% C steel (carburized)	20	1245
Co-W	20	850
Cr	20	952

реализуется схема «жесткое покрытие на мягкой подложке». В этом случае тонкое гальваническое покрытие (Cr или Co-W) не получает достаточной опоры от подложки, подвергается значительным изгибающим напряжениям и легко разрушается. Разрушенные фрагменты покрытия участвуют в дальнейшем изнашивании по абразивному механизму.

На упрочненных подложках (цементованная сталь 20 и ЭП-закаленная сталь 45, микротвердость 1178...1245 HV) реализуется схема «жесткое покрытие на жесткой подложке». Высокая твердость диффузионного слоя обеспечивает необходимую несущую способность, предотвращая значительную деформацию и проламывание гальванического покрытия. В этом случае изнашивание происходит преимущественно в пределах самого покрытия.

Сравнение микротвердости покрытий показывает, что микротвердость хрома (952 HV) несколько выше, чем у сплава Co-W (850 HV). Это наряду с особенностями структуры покрытий может объяснять более высокую износостойкость хромовых покрытий в условиях трения со смазкой.

Выводы

Проведенные исследования показали, что комбинированная обработка, включающая в себя электролитно-плазменное упрочнение подложки с последующим нанесением гальванических покрытий, является эффективным способом повышения износостойкости углеродистых сталей в условиях возвратно-поступательного трения со смазкой. Установлено, что износостойкость комбинированных покрытий зависит как от свойств подложки, так и от толщины и типа гальванического покрытия. Наиболее высокие показатели износостойкости достигаются при оптимальном сочетании метода упрочнения подложки и вида защитного покрытия.

После анализа результатов трибологических испытаний комбинированных покрытий, гальванических покрытий и подложек можно сделать следующие выводы.

1. Электролитно-плазменная обработка без нанесения гальванических покрытий существенно повышает износостойкость сталей 20 и 45. После двух суток трения объемный

износ необработанной стали 20 составляет $17\,495 \cdot 10^3 \text{ мкм}^3$, тогда как у цементованной стали 20 – $37 \cdot 10^3 \text{ мкм}^3$ (снижение более чем в 470 раз). Цементованная сталь 20 демонстрирует более высокую износостойкость, чем сталь 45 после ЭП-закалки.

2. Материал подложки оказывает определяющее влияние на износостойкость комбинированных покрытий. На необработанной стали тонкие гальванические покрытия склонны к проламыванию (износ Co-W 1 мкм на необработанной стали 20 после двух суток – $8127 \cdot 10^3 \text{ мкм}^3$). Наилучшие результаты достигнуты на цементованной стали 20: объемный износ системы «цементованная сталь 20 + Cr (1 мкм)» после двух суток составляет $3,5 \cdot 10^3 \text{ мкм}^3$, что более чем в 2300 раз ниже, чем у необработанной стали 20 без покрытия, и более чем в 2300 раз ниже, чем у Co-W (1 мкм) на необработанной подложке.

3. Толщина и тип гальванического покрытия существенно влияют на износостойкость. Увеличение толщины с 1 до 10 мкм приводит к росту износа. После двух суток трения для хромового покрытия износ Cr (1 мкм) на цементованной стали 20 составляет $3,5 \cdot 10^3 \text{ мкм}^3$, тогда как износ Cr (10 мкм) – $74 \cdot 10^3 \text{ мкм}^3$ (увеличение более чем в 20 раз); для покрытия Co-W: износ Co-W (1 мкм) на цементованной стали 20 составляет $266 \cdot 10^3 \text{ мкм}^3$, тогда как износ Co-W (10 мкм) – $426 \cdot 10^3 \text{ мкм}^3$.

4. Наиболее высокая износостойкость достигнута при комбинации стали 20 после электролитно-плазменной цементации с последующей закалкой и тонкого (1 мкм) хромового покрытия. После двух суток трения объемный износ этой системы составляет $3,5 \cdot 10^3 \text{ мкм}^3$, что существенно ниже, чем у аналогичной системы с покрытием Co-W (1 мкм) на той же подложке ($266 \cdot 10^3 \text{ мкм}^3$). Данная комбинация устраняет проблему проламывания покрытия и обеспечивает максимальную износостойкость при сохранении относительно мягкой сердцевинной детали.

Комбинированный способ упрочнения поверхности стали позволяет устранить проблему проламывания гальванического покрытия, а также увеличивает износостойкость гальванического покрытия за счет снижения его толщины.

Комбинирование хромового покрытия на стали 20 после электролитно-плазменной

цементации с последующей закалкой является оптимальным способом для решения задачи создания твердой поверхности детали при сохранении мягкой сердцевины. Наличие гальванического покрытия делает возможным создать более толстый упроченный поверхностный слой, поскольку цементация без гальванических покрытий имеет ограничение по глубине, как и хромовое покрытие – по толщине. За счет этого может достигаться увеличенная толщина упроченного слоя и повышаться износостойкость системы в целом.

Список литературы

1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. – 5-е изд., испр. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 944 с. – ISBN 5-217-03085-2.
2. The investigation of structural, mechanical and tribological properties of plasma nitrocarburized AISI 1020 steel / A. Çelik, M. Karakan, A. Alsaran, I. Efeoglu // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – Vol. 200 (5–6). – P. 1926–1932. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.08.028.
3. Improvement of wear resistance for C45 steel using plasma nitriding, nitrocarburizing and nitriding/manganese phosphating duplex treatment / T.V. Doan, D. Kusmič, M. Pospíchal, D. Dobrocký // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 179. – P. 012017. – DOI: 10.1088/1757-899X/179/1/012017.
4. The influence of carburization parameters on the mechanical behavior of mild steel: a review / M.J. Madu1, O. Adedipe, S.A. Lawal, A.S. Abdulrahman // *Journal of Engineering and Applied Science*. – 2025. – Vol. 72. – P. 193. – DOI: 10.1186/s44147-025-00776-9.
5. Improving the impact wear properties of medium carbon steel by adjusting microstructure under alternating quenching in water and air / F. Zhang, T. Zhang, H. Gou, S. Chen, D. Wu, H. Wei, X. Chong, Z. Li, X. Wu, Q. Shan // *Wear*. – 2023. – Vol. 512–513. – P. 204531. – DOI: 10.1016/j.wear.2022.204531.
6. Okonkwo B.O., Jeong C., Jang C. Advances on Cr and Ni electrodeposition for industrial applications: a review // *Coatings*. – 2022. – Vol. 12 (10). – P. 1555. – DOI: 10.3390/coatings12101555.
7. Experimental studies on the effect of chromium plating on the mechanical properties of SAE 4140 steel / M.N. Akhtar, A. Lohchab, D. Singh, R.R. Kumar, P. Gaur, B.K. Yadav // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – Vol. 72 (4). – P. 2488–2496. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.09.527.
8. Formation of diffusion layers by anode plasma electrolytic nitrocarburizing of low-carbon steel / S.A. Kusmanov, Yu.V. Kusmanova, A.R. Naumov, P.N. Belkin // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2015. – Vol. 24. – P. 3187–3193. – DOI: 10.1007/s11665-015-1578-y.
9. Belkin P.N., Kusmanov S.A. Plasma electrolytic hardening of steels: Review // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2016. – Vol. 52 (6). – P. 531–546. – DOI: 10.3103/S106837551606003X.
10. Effect of current density on mechanical and tribological properties of wear-resistant Cr coatings / M. Hagarová, G. Baranová, A. Mašlejová, P. Horňák, D. Csík, M. Vojtko, M. Truchlý // *Crystals*. – 2025. – Vol. 15 (11). – P. 936. – DOI: 10.3390/cryst15110936.
11. Beyragh M.R.S., Khameneh Asl Sh., Norouzi S. A comparative research on corrosion behavior of a standard, crack-free and duplex hard chromium coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 205 (7). – P. 2032–2037. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.10.009.
12. Almotairi A., Warkentin A., Farhat Z. Mechanical damage of hard chromium coatings on 416 stainless steel // *Engineering Failure Analysis*. – 2016. – Vol. 66. – P. 130–140. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.04.011.
13. Kir H., Apay S. Effect of hard chrome plating parameters on the wear resistance of low carbon steel // *Materials Testing*. – 2019. – Vol. 61 (11). – P. 1082–1086. – DOI: 10.3139/120.111423.
14. Effect of current density on the texture, residual stress, microhardness and corrosion resistance of electrodeposited chromium coating / J. Yang, P. Ji, J. Zhang, W. Xu, J. Jiao, Y. Lian, L. Jiang, B. Zhang // *Surface and Coatings Technology*. – 2023. – Vol. 471. – P. 129868. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129868.
15. Capel H., Shipway P.H., Harris S.J. Sliding wear behaviour of electrodeposited cobalt–tungsten and cobalt–tungsten–iron alloys // *Wear*. – 2003. – Vol. 255 (7–12). – P. 917–923. – DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00241-2.
16. European Parliament and Council of the European Union. Regulation (EC) No 1907/2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) // *Official Journal of the European Union*. – 2006. – L 396. – P. 1–849. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32006R1907> (accessed: 19.08.2026).
17. McCarty E. Anti-wear improvement of stamping die materials through duplex chroming // *Great Designs in Steel (GDIS) 2018*. – Southfield, MI: Auto/Steel Partnership, 2018. – 26 p. – URL: <https://www.steel.org/wp-content/uploads/2023/01/Track-3-McCarty.pdf> (accessed: 07.04.2026).

18. Possibilities of using the duplex system plasma nitriding + CrN coating as a replacement for hard chrome plating / D. Dobrocky, P. Pokorny, Z. Studeny, I. Barenyi, V. Hruby // *Coatings*. – 2022. – Vol. 12 (12). – P. 1953. – DOI: 10.3390/coatings12121953.

19. Microstructure of electroplated hard chromium coatings after plasma nitrocarburizing / L. Wanga, D.S. Kim, K.S. Nam, M. Kim, S.C. Kwon // *Surface and Coatings Technology*. – 2005. – Vol. 190 (2–3). – P. 151–154. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.08.213.

20. A review of wear-resistant coatings for steel substrates / Y. Wang, C. Feng, T. Lin, R. Zhu, J. Zhang, H. Yang, S. Yi, J. He, M. Tu, G. Wei // *Metals*. – 2025. – Vol. 15 (11). – P. 1231. – DOI: 10.3390/met15111231.

21. Белкин П.Н., Кусманов С.А. Электролитно-плазменная цементация металлов и сплавов // *Электронная обработка материалов*. – 2020. – Т. 56, № 5. – С. 40–74. – DOI: 10.5281/zenodo.4045823.

22. Wear and corrosion studies of duplex surface-treated AISI-304 steel by a combination of cathodic cage plasma nitriding and PVD-TiN coating / M. Naeem, S. Awan, M. Shafiq, H.A. Raza, J. Iqbal, J.C. Díaz-Guillén, R.R.M. Sousa, M. Jelani, M. Abrar // *Ceramics International*. – 2022. – Vol. 48 (15). – P. 21473–21482. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.04.115.

23. Sliding wear behavior of duplex coatings with different plasma nitride layers and a Cr-Al-Ti-B-N coating / T. Weinhold, A. Dalke, A. Schramm, H. Biermann // *Engineering Reports*. – 2022. – Vol. 4. – P. e12377. – DOI: 10.1002/eng2.12377.

24. Effect of carburizing and nitriding duplex treatment on the friction and wear properties of 20CrNi2Mo steel / J. Chen, S. Li, Y. Liang, X. Tian, J. Gu // *Materials Research Express*. – 2023. – Vol. 10 (3). – P. 036507. – DOI: 10.1088/2053-1591/accc00f.

25. Повышение износостойкости поверхности стали 20 электролитно-плазменным упрочнением и электроосаждением упрочняющих Co–W покрытий / С.А. Силкин, С.А. Кусманов, А.С. Перков, О.Л. Алтухова // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2023. – № 11. – С. 416–420. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-416-417.

26. Солодкова Л.Н., Кудрявцев В.Н. Электролитическое хромирование. – Москва: Глобус, 2007. – 191 с. – (Приложение к журналу «Гальванотехника и обработка поверхности»). – ISBN 5-8155-0209-X.

27. Белевский С.С., Цынцару Н.И., Дикусар А.И. Электроосаждение нанокристаллических Co–W покрытий из цитратных электролитов в контролируемых гидродинамических условиях. II. Скорость электроосаждения и состав покрытий // *Электронная обработка материалов*. – 2010. – № 2 (262). – С. 9–18. – EDNЖ QYXLMD.

28. Modern trends in tungsten alloys electrodeposition with iron group metals / N. Tsyntsar, H. Cesiulis, M. Donten, J. Sort, E. Pellicer, E.J. Podlaha-Murphy // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2012. – Vol. 48 (6). – P. 491–520. – DOI: 10.3103/S1068375512060038.

29. Friction and sliding wear behaviour of electrodeposited cobalt and cobalt–tungsten alloy coatings used as overlays for copper conductors / D.P. Weston, P.H. Shipway, S.J. Harris, M.K. Cheng // *Wear*. – 2009. – Vol. 267 (5–8). – P. 934–943. – DOI: 10.1016/j.wear.2009.01.006.

30. Crack density and tribological performance of hard-chrome coatings / B. Podgornik, O. Massler, F. Kafexhiu, M. Sedlacek // *Tribology International*. – 2018. – Vol. 121. – P. 333–340. – DOI: 10.1016/j.triboint.2018.01.055.

31. A comparison of microstructural, mechanical and tribological properties of WC-10Co4Cr – HVOF coating and hard chrome to use in hydraulic cylinders / R. de Medeiros Castro, A. da Silva Rocha, E.I. Mercado Curi, F. Peruch // *American Journal of Materials Science*. – 2018. – Vol. 8 (1). – P. 15–26. – DOI: 10.5923/j.materials.20180801.03.

32. The impact of surface cracks and surface roughness in the performance of hard chromium coatings in cold rolling applications / Z. Ranjbar-Nouri, D. Matthews, H. Bolt, M. de Rooij // *Applied Surface Science Advances*. – 2025. – Vol. 27. – P. 100788. – DOI: 10.1016/j.apsadv.2025.100788.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Comparative assessment of wear resistance of combined coatings on carbon steels produced by electrolytic-plasma treatment followed by Cr or Co–W electrodeposition

Alexander Perkov^{1, a, *}, Sergey Silkin^{1, b}, Sergey Kusmanov^{2, c}, Ivan Tambovskiy^{2, d}

¹ Kostroma State University, 17 Dzerzhinskogo St., Kostroma, 156005, Russian Federation

² Moscow State Technological University “STANKIN”, 1 Vadkovsky Lane, Moscow, 127055, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-5265-5186>, sachaperkow@gmail.com; ^b <https://orcid.org/0000-0002-3915-642X>, longamin@mail.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0002-7156-102X>, sakusmanov@yandex.ru; ^d <https://orcid.org/0000-0002-7633-6059>, ivan.vt@itambovskiy.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 09 May 2026

Revised: 25 May 2026

Accepted: 29 July 2026

Available online: 15 September 2026

Keywords:

Electrolytic-plasma carburizing

Galvanic coatings

Chromium coating

Co–W coating

Combined treatment

Lubricated friction

Wear resistance

Carbon steel

Surface hardening

Reciprocating sliding

Funding

This research was funded by the Russian Science Foundation (grant No. 22-29-20231) to Kostroma State University.

ABSTRACT

Introduction. 0.2% C and 0.45% C carbon structural steels exhibit insufficient wear resistance under reciprocating sliding in lubricated conditions, which limits the service life of machine components. This study investigates the wear resistance of a combined surface treatment involving electrolytic-plasma hardening (quenching or carburizing followed by quenching) followed by the deposition of chromium and Co–W galvanic coatings of different thicknesses. **Materials and methods.** Samples were subjected to electrolytic-plasma carburizing at 850 °C for 3 min or quenching at 900 °C in aqueous electrolytes. Subsequently, Cr and Co–W coatings with thicknesses of 1 and 10 µm were deposited on the prepared surfaces. Wear resistance was evaluated using a reciprocating sliding test with a bearing steel ball (0.1% C–15% Cr) under a load of 10 N in mineral oil for 1–3 days, with wear volume measured by profilometry. **Results and discussion.** It was found that the combined treatment significantly improved wear resistance compared to the individual hardening methods. On untreated steel, thin galvanic coatings were prone to breakthrough, resulting in low wear resistance of the system. Electrolytic-plasma quenching of 0.45% C steel improved the performance compared to the untreated condition; however, the best results were achieved on carburized steel 20. Increasing the coating thickness from 1 to 10 µm led to a decrease in wear resistance. The highest wear resistance was demonstrated by the system consisting of 0.2% C steel after electrolytic-plasma carburizing followed by quenching and a thin (1 µm) chromium coating. The obtained results can be used in the development of effective surface hardening technologies for components operating under lubricated sliding conditions (shafts, guides, hydraulic cylinder elements), while maintaining a relatively soft core.

For citation: Perkov A.S., Silkin S.A., Kusmanov S.A., Tambovskiy I.V. Comparative assessment of wear resistance of combined coatings on carbon steels produced by electrolytic-plasma treatment followed by Cr or Co–W electrodeposition. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 3, pp. 129–146. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.3-129-146. (In Russian).

References

1. Dal'skii A.M., Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K., Suslov A.G., eds. *Spravochnik tekhnologamashinostroytelya*. V 2 t. T. 2 [Handbook of the mechanical engineering technologist. In 2 vol. Vol. 2]. 5th ed., corrected. Moscow, Mashinostroyeniye-1 Publ., 2003. 944 p. ISBN 5-217-03085-2.
2. Çelik A., Karakan M., Alsaran A., Efeoglu I. The investigation of structural, mechanical and tribological properties of plasma nitrocarburized AISI 1020 steel. *Surface and Coatings Technology*, 2005, vol. 200 (5–6), pp. 1926–1932. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.08.028.

* Corresponding author

Perkov Alexander S., Post-graduate Student
 Kostroma State University,
 17 Dzerzhinskogo St.,
 156005, Kostroma, Russian Federation
 Tel.: +7 910 808-41-87, e-mail: sachaperkow@gmail.com

3. Doan T.V., Kusmič D., Pospíchal M., Dobrocký D. Improvement of wear resistance for C45 steel using plasma nitriding, nitrocarburizing and nitriding/manganese phosphating duplex treatment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 179, p. 012017. DOI: 10.1088/1757-899X/179/1/012017.
4. Madu M.J., Adedipe O., Lawal S.A., Abdulrahman A.S. The influence of carburization parameters on the mechanical behavior of mild steel: a review. *Journal of Engineering and Applied Science*, 2025, vol. 72, p. 193. DOI: 10.1186/s44147-025-00776-9.
5. Zhang F., Zhang T., Gou H., Chen S., Wu D., Wei H., Chong X., Li Z., Wu X., Shan Q. Improving the impact wear properties of medium carbon steel by adjusting microstructure under alternating quenching in water and air. *Wear*, 2023, vol. 512–513, p. 204531. DOI: 10.1016/j.wear.2022.204531.
6. Okonkwo B.O., Jeong C., Jang C. Advances on Cr and Ni electrodeposition for industrial applications: a review. *Coatings*, 2022, vol. 12 (10), p. 1555. DOI: 10.3390/coatings12101555.
7. Akhtar M.N., Lohchab A., Singh D., Kumar R.R., Gaur P., Yadav B.K. Experimental studies on the effect of chromium plating on the mechanical properties of SAE 4140 steel. *Materials Today: Proceedings*, 2023, vol. 72 (4), pp. 2488–2496. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.09.527.
8. Kusmanov S.A., Kusmanova Yu.V., Naumov A.R., Belkin P.N. Formation of diffusion layers by anode plasma electrolytic nitrocarburizing of low-carbon steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, vol. 24, pp. 3187–3193. DOI: 10.1007/s11665-015-1578-y.
9. Belkin P.N., Kusmanov S.A. Plasma electrolytic hardening of steels: Review. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2016, vol. 52 (6), pp. 531–546. DOI: 10.3103/S106837551606003X.
10. Hagarová M., Baranová G., Mašlejová A., Horňák P., Csík D., Vojtko M., Truchlý M. Effect of current density on mechanical and tribological properties of wear-resistant Cr coatings. *Crystals*, 2025, vol. 15 (11), p. 936. DOI: 10.3390/cryst15110936.
11. Beyragh M.R.S., Khameneh Asl Sh., Norouzi S. A comparative research on corrosion behavior of a standard, crack-free and duplex hard chromium coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2010, vol. 205 (7), pp. 2032–2037. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.10.009.
12. Almotairi A., Warkentin A., Farhat Z. Mechanical damage of hard chromium coatings on 416 stainless steel. *Engineering Failure Analysis*, 2016, vol. 66, pp. 130–140. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.04.011.
13. Kir H., Apay S. Effect of hard chrome plating parameters on the wear resistance of low carbon steel. *Materials Testing*, 2019, vol. 61 (11), pp. 1082–1086. DOI: 10.3139/120.111423.
14. Yang J., Ji P., Zhang J., Xu W., Jiao J., Lian Y., Jiang L., Zhang B. Effect of current density on the texture, residual stress, microhardness and corrosion resistance of electrodeposited chromium coating. *Surface and Coatings Technology*, 2023, vol. 471, p. 129868. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129868.
15. Capel H., Shipway P.H., Harris S.J. Sliding wear behaviour of electrodeposited cobalt–tungsten and cobalt–tungsten–iron alloys. *Wear*, 2003, vol. 255 (7–12), pp. 917–923. DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00241-2.
16. European Parliament and Council of the European Union. Regulation (EC) No 1907/2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH). *Official Journal of the European Union*, 2006, L 396, pp. 1–849. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32006R1907> (accessed 19.08.2026).
17. McCarty E. Anti-wear improvement of stamping die materials through duplex chroming. *Great Designs in Steel (GDIS) 2018*. Southfield, MI, Auto/Steel Partnership, 2018. 26 p. Available at: <https://www.steel.org/wp-content/uploads/2023/01/Track-3-McCarty.pdf> (accessed 07.04.2026).
18. Dobrocký D., Pokorný P., Studeny Z., Barený I., Hruby V. Possibilities of using the duplex system plasma nitriding + CrN coating as a replacement for hard chrome plating. *Coatings*, 2022, vol. 12 (12), p. 1953. DOI: 10.3390/coatings12121953.
19. Wang L., Kim D.S., Nam K.S., Kim M., Kwon S.C. Microstructure of electroplated hard chromium coatings after plasma nitrocarburizing. *Surface and Coatings Technology*, 2005, vol. 190 (2–3), pp. 151–154. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2004.08.213.
20. Wang Y., Feng C., Lin T., Zhu R., Zhang J., Yang H., Yi S., He J., Tu M., Wei G. A review of wear-resistant coatings for steel substrates: applications and challenges. *Metals*, 2025, vol. 15 (11), p. 1231. DOI: 10.3390/met15111231.
21. Belkin P.N., Kusmanov S.A. Elektrolitno-plazmennaya tsementatsiya metallov i splavov [Electrolytic-plasma carburizing of metals and alloys]. *Elektronnaya obrabotka materialov = Electronic Processing of Materials*, 2020, vol. 56, no. 5, pp. 40–74. DOI: 10.5281/zenodo.4045823. (In Russian).
22. Naeem M., Awan S., Shafiq M., Raza H.A., Iqbal J., Díaz-Guillén J.C., Sousa R.R.M., Jelani M., Abrar M. Wear and corrosion studies of duplex surface-treated AISI-304 steel by a combination of cathodic cage plasma

nitriding and PVD-TiN coating. *Ceramics International*, 2022, vol. 48 (15), pp. 21473–21482. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.04.115.

23. Weinhold T., Dalke A., Schramm A., Biermann H. Sliding wear behavior of duplex coatings with different plasma nitride layers and a Cr-Al-Ti-B-N coating. *Engineering Reports*, 2022, vol. 4, p. e12377. DOI: 10.1002/eng2.12377.

24. Chen J., Li S., Liang Y., Tian X., Gu J. Effect of carburizing and nitriding duplex treatment on the friction and wear properties of 20CrNi2Mo steel. *Materials Research Express*, 2023, vol. 10 (3), p. 036507. DOI: 10.1088/2053-1591/acc00f.

25. Silkin S.A., Kusmanov S.A., Perkov A.S., Altukhova O.L. Povyshenie iznosostoikosti poverkhnosti stali 20 elektrolitno-plazmennym uprochneniem i elektroosazhdeniem uprochnyayushchikh Co–W pokrytii [Increasing the wear resistance of the surface of steel 20 by electrolytic-plasma hardening and electrodeposition of hardening Co–W coatings]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula state university. Technical sciences*, 2023, no. 11, pp. 416–420. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-416-417.

26. Solodkova L.N., Kudryavtsev V.N. *Elektroliticheskoe khromirovanie* [Electrolytic chromium plating]. Moscow, Globus Publ., 2007. 191 p.

27. Belevskii S.S., Tsyntaru N.I., Dikusar A.I. Electrodeposition of nanocrystalline Co-W coatings from citrate electrolytes under conditions of controlled hydrodynamic: II. The electrodeposition rate and composition of the coatings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2010, vol. 46, no. 2, pp. 91–99. DOI: 10.3103/S106837551002002X. Translated from *Elektronnaya obrabotka materialov*, 2010, no. 2 (262), pp. 9–18.

28. Tsyntaru N., Cesiulis H., Donten M., Sort J., Pellicer E., Podlaha-Murphy E.J. Modern trends in tungsten alloys electrodeposition with iron group metals. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2012, vol. 48 (6), pp. 491–520. DOI: 10.3103/S1068375512060038.

29. Weston D.P., Shipway P.H., Harris S.J., Cheng M.K. Friction and sliding wear behaviour of electrodeposited cobalt and cobalt–tungsten alloy coatings used as overlays for copper conductors. *Wear*, 2009, vol. 267 (5–8), pp. 934–943. DOI: 10.1016/j.wear.2009.01.006.

30. Podgornik B., Massler O., Kafexhiu F., Sedlaček M. Crack density and tribological performance of hard-chrome coatings. *Tribology International*, 2018, vol. 121, pp. 333–340. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.01.055.

31. Medeiros Castro R. de M., da Silva Rocha A., Mercado Curi E.I., Peruch F. A comparison of microstructural, mechanical and tribological properties of WC-10Co4Cr – HVOF coating and hard chrome to use in hydraulic cylinders. *American Journal of Materials Science*, 2018, vol. 8 (1), pp. 15–26. DOI: 10.5923/j.materials.20180801.03.

32. Ranjbar-Nouri Z., Matthews D., Bolt H., de Rooij M. The impact of surface cracks and surface roughness in the performance of hard chromium coatings in cold rolling applications. *Applied Surface Science Advances*, 2025, vol. 27, p. 100788. DOI: 10.1016/j.apsadv.2025.100788.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).