

Научная статья
УДК 621.757
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-458-473>
EDN: HIKZCC



ИССЛЕДОВАНИЯ АДГЕЗИОННЫХ И ИЗНОСОУСТОЙЧИВЫХ СВОЙСТВ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ И ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

А. Н. Котомчин¹, В. А. Зорин²

¹Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко,
г. Тирасполь, Молдавия

²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
г. Москва, Россия

aleshka81@list.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4750-525>
madi-dm@list.ru, <http://orcid.org/0009-0006-8565-7707>

АННОТАЦИЯ

Введение. Использование хромирования в качестве способа восстановления деталей, работающих при гидроабразивном изнашивании, имеет большое значение для восстановления работоспособности агрегатов и деталей гидропривода, используемых на специализированном автотранспорте и дорожно-строительной технике. Предлагаемый способ восстановления хромированием обладает необходимыми преимуществами, это достаточно высокая производительность и микротвердость получаемых хромовых покрытий. Однако для внедрения в производство потребовались дополнительные исследования надёжности получаемых хромовых покрытий, а именно прочность сцепления и износостойкость. Это позволит сделать выводы перспектив дальнейшего внедрения и использования для восстановления деталей гидропривода и других деталей, которые работают при гидроабразивном изнашивании.

Материалы и методы. Для проведения исследований использовалось оборудование, отвечающее требованиям технических условий, с использованием существующих и разработанных приспособлений и приборов для получения хромированных осадков. С этой целью были изготовлены необходимые приспособления и образцы из соответствующего материала для приближения достоверности получаемых результатов исследований. Также для оцифровки получаемых данных на машине трения были произведены необходимые усовершенствования.

Результаты. Выполненные исследования прочности сцепления показали, что данные хромовые покрытия из нового состава электролита позволят получать прочность сцепления, достигающее 270 МПа, что достаточно для деталей, работающих при больших давлениях (20 МПа) с необходимым запасом прочности. Также проведенные исследования износостойкости хромовых покрытий позволили заключить, что износостойкость получаемых хромовых покрытий выше на 20 – 30% по сравнению с эталонной поверхностью (материал изготовления золотника).

Обсуждение и заключение. Исследования полученных хромовых покрытий из нового состава электролита установили закономерности влияния состава электролита и режимов проведения испытания на износостойкость получаемых осадков по сравнению с существующим универсальным электролитом хромирования. Полученные результаты подтвердили возможность использования хромового покрытия из нового электролита хромирования для восстановления деталей автомобилей и дорожно-строительных машин, работающих при гидроабразивном изнашивании.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: хромирование, холодный электролит, прочность сцепления, износостойкость, гидроабразивное изнашивание

БЛАГОДАРНОСТИ: благодарность рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 06.07.2023; одобрена после рецензирования 28.08.2023; принята к публикации 30.08.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

© Котомчин А. Н., Зорин В. А., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Котомчин А. Н., Зорин В. А. Исследования адгезионных и износостойчивых свойств хромовых покрытий для восстановления деталей автомобилей и дорожно-строительной техники // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 4 (92). С. 458-473. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-458-473>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-458-473>

EDN: HIKZCC

STUDIES OF ADHESIVE AND WEAR-RESISTANT PROPERTIES OF CHROME COATINGS FOR CAR PARTS AND ROAD CONSTRUCTION EQUIPMENT RESTORATION

Aleksei N. Kotomchin¹, Vladimir A. Zorin²

¹T.G. Shevchenko Pridnestrovian State University
Tiraspol, Moldavia.

²Moscow State Automobile and Highway Technical University (MADI),
Moscow, Russia

aleshka81@list.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4750-525>
madi-dm@list.ru, <http://orcid.org/0009-0006-8565-7707>

ABSTRACT

Introduction. The use of chrome plating as a method of restoring parts that work with waterjet wear is important for restoring the operability of hydraulic drive units and parts used in specialized vehicles and road construction equipment. The proposed method of chrome recovery has the necessary advantages, it is a sufficiently high performance and microhardness of the resulting chrome coatings. However, for implementation in production, additional studies of the reliability of the chrome coatings obtained, namely, adhesion strength and wear resistance, were required. This will make possible to draw conclusions about the prospects for further implementation and use for the restoration of hydraulic drive parts and other parts that work with waterjet wear.

Materials and methods. To conduct the research, equipment meeting the requirements of technical conditions, using existing and developed devices and devices for obtaining chrome precipitation was used. For this purpose, the necessary devices and samples from the appropriate material to approximate the reliability of the obtained research results were made. Also the necessary improvements to digitize the data obtained on the friction machine were made.

Results. The performed studies of adhesion strength have shown that the chrome coatings obtained from the new electrolyte composition will make possible to obtain adhesion strength reaching 270 MPa, which is sufficient for parts operating at high pressures (20 MPa) with the necessary margin of safety. Also the studies conducted on the wear resistance of chrome coatings let to conclude that the wear resistance of the chrome coatings obtained is 20-30% higher compared to the reference surface (the material of the spool manufacture).

Discussion and conclusion. The studies of the obtained chrome coatings from the new electrolyte composition made possible to establish, which let to establish the regularities of the influence of the electrolyte composition and the modes of testing the wear resistance of the precipitation obtained compared with the existing universal chromium plating electrolyte. The results obtained confirmed the possibility of using a chrome coating from a new chromium plating electrolyte for the restoration of car parts and road construction machines operating under waterjet wear.

KEYWORDS: chrome plating, cold electrolyte, adhesion strength, wear resistance, waterjet wear

ACKNOWLEDGEMENT. We are grateful to the reviewers of the article.

The article was submitted 06.07.2023; approved after reviewing 28.08.2023; accepted for publication 30.08.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Aleksei N. Kotomchin, Vladimir A. Zorin Studies of adhesive and wear-resistant properties of chrome coatings for car parts and road construction equipment restoration. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (4): 458-473. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-4-458-473>

© Kotomchin A. N., Zorin V. A., 2023



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что по экономическим соображениям в нашей стране эксплуатация техники происходит с большими пробегами и наработкой. В результате чего количество отказов возрастает, что приводит к увеличению простоев в ТО и ремонте. Поэтому требуется проводить качественный ремонт с восстановлением работоспособности, с целью обеспечения надёжности на достаточном уровне с минимальными затратами. Восстановление деталей автомобилей и дорожно-строительной техники имеет большое экономическое значение для экономики страны. При этом отремонтированная машина должна ещё проработать не менее 80% от первоначального ресурса. Поэтому необходимо уделять большое внимание новым технологиям восстановления деталей, которые должны продлевать ресурс детали и восстанавливать машину ещё на один период эксплуатации не сильно уступающим новой машине^{1, 2, 3} [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

Современная техника, в которой используются детали, зачастую имеет незначительный износ (менее 0,5 мм), который приводит к потере работоспособности агрегата и автомобиля в целом. Поэтому использование хромирования в качестве способа восстановления становится возможным для деталей, работающих при гидроабразивном изнашивании. При этом положительные качества (высокая износостойкость и прочность сцепления) делает их одним из перспективных⁴ [9, 10, 11, 12, 13].

Изучение прочности сцепления и износостойкости хромовых получаемых покрытий имеет большое значение, с целью дальнейшего практического использования при вос-

становлении деталей автомобилей и дорожно-строительной техники^{5, 6}. Это связано с тем, что данные детали работают с очень малыми зазорами, равными несколько микрон, что может приводить к разрушению прецизионной пары или к её заклиниванию. Поэтому от результатов исследования прочности сцепления будет зависеть дальнейшее использование получаемых покрытий для восстановления деталей автомобилей и дорожно-строительной техники.

Полученные результаты исследований электролитов хромирования позволили разработать новый способ получения электролитического покрытия – холодный саморегулирующийся электролит хромирования [14], обладающий рядом преимуществ в сравнении с существующими электролитами хромирования⁷ [15, 16, 17, 18, 19]:

1. Достаточно большая производительность (выход по току 46–50%).
2. Более широкий диапазон рабочих температур (18–35 °С).
3. Хорошая рассеивающая способность.

При разработке любого электролита хромирования, с целью использования для восстановления деталей, возникает необходимость исследований их на прочность сцепления и износостойкость, которые являются важными характеристиками хромового покрытия. Поэтому проведение испытаний на адгезионную износостойкость является заключительным этапом проведения исследований хромовых покрытий перед практическим использованием и эксплуатационным испытанием восстановленных деталей автомобилей и дорожно-строительной техники, работающих при гидроабразивном изнашивании.

¹ Черноиванов В. И., Голубев И. Г. Восстановление деталей машин (состояние и перспективы) / М.: ФГНУ «Росинформ-агротех». 2010. 376 с.

² Восстановление деталей машин: справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов [и др.] / под общей редакцией В. П. Иванова. М: Машиностроение, 2003. 672 с.

³ Носенко А. С., Домницкий А. А. Исследование надёжности и совершенствование конструкции контейнерных мусоровозов // Погрузочно-транспортные, строительно-дорожные и коммунальные машины. Технический сервис и конструкции: сб. науч. тр. / Шахтинский ин-т ЮРГТУ. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2004. С. 19 – 24.

⁴ Петров Ю. Н., Корнейчук Н. И. и др. Прогрессивные способы восстановления деталей машин и повышения их прочности // Межвузовский сборник научных трудов. Кишинев: Кишиневский сельскохозяйственный институт им. М. В. Фрунзе, 1979. С. 48–51.

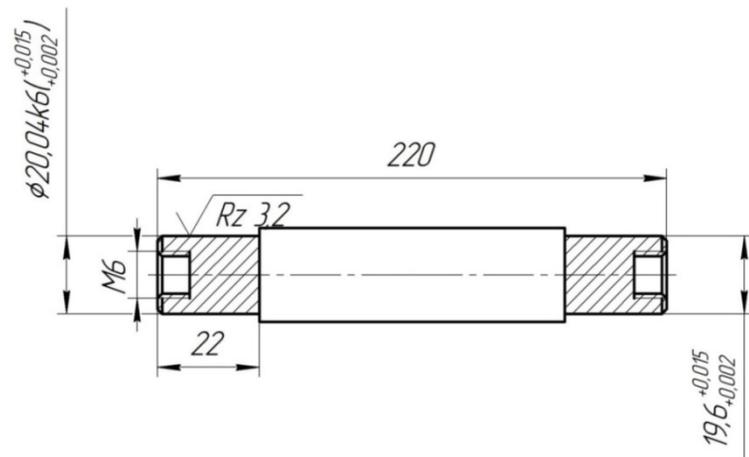
⁵ Зорин В.А. Основы работоспособности технических систем: учебник для вузов. М.: ООО «Магистр-Пресс», 2005. 536 с.

⁶ Зорин В.А. Надёжность механических систем: учебник для вузов. М.: Изд. «ИНФРА-М», 2015. 379 с.

⁷ Стратулат М. П. Восстановление и упрочнение деталей машин скоростным электролитическим хромированием // Тезисы докладов международной научно-практической конференции, «Инженерно-техническое обеспечение АПК и машино-технологические станции в условиях реформирования». Т 1. Орел, 2000. С. 97 – 98.



а



б

Рисунок 1 – Оборудование для испытания прочности сцепления:
а – приспособление с прессом для исследований; б – чертёж вала-образца⁸ [15]

Figure 1 – Equipment for testing the strength of adhesion:
a – a device with a press for research, b - a drawing of the sample shaft [15]

Целью исследований является анализ прочности сцепления и износостойкости получаемых хромовых покрытий из разработанного нового состава электролита по сравнению с существующим электролитом (универсального), с целью использования данного способа для восстановления деталей автомобилей и дорожно-строительной техники, работающих при гидроабразивном изнашивании.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

При проверке прочности сцепления получаемых хромовых покрытий использовали методику по ГОСТ-9.302–88. Для этого применяли необходимое оборудование в виде прессы с усилием 100 кН и вала-образца, который покрывался на необходимую толщину хромовым покрытием. Во время проверки прочности сцепления получаемых хромовых покрытий использовали многократную запрессовку-выпрессовку (циклы) матрицы для испытаний с необходимыми размерами (рисунок 1, а).

Для проведения исследований на прочность сцепления применяли образец-вал, который был изготовлен из стали марки 45 по ГОСТ-1050–88. Шейку готовили обработкой для покрытий с первоначальным размером с учётом толщины первоначального покрытия

0,3–0,35 – диаметром 19,60 мм, с последующим шлифованием до толщины 20,04...20,05 мм. В качестве матрицы (контртела) использовали шариковый радиально-упорный подшипник №204 ГОСТ 831–75 с внутренним диаметром $20^{+0,015}_{+0,002}$ мм [20].

Шлифование хромированной поверхности осуществляли до шероховатости 3,2 мкм (рисунок 1, б).

При определении прочности сцепления получаемых хромовых покрытий с основой образца использовали формулу

$$\tau_{\text{пр.сц.}} = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot b}, \quad (1)$$

где $\tau_{\text{пр.сц.}}$ – прочность сцепления хромового покрытия, МПа;

F – измеренный сдвиг на вал-образец, Н;

D – диаметр вала-образца, мм;

b – толщина хромового покрытия после шлифования, мм.

При испытаниях значение посадки с натягом превышало допуск в несколько раз. Запрессовку контртела на вал-образец производили с помощью прессы при различных нагрузках – от 0 МПа до нагрузки, при которой будет происходить разрушение и отделение хромированной поверхности (рисунок 2).

⁸ Котомчин А.Н. Совершенствование технологии электролитического хромирования для восстановления деталей автомобилей, работающих при гидроабразивном изнашивании: дис. канд. техн. наук: 05.22.10. М., 2022. 198 с.



Рисунок 2 – Вид испытуемого образца-вала в зависимости от нагрузки: а – при нагрузке 0 МПа; б – при нагрузке до 270 МПа; в – при нагрузке 300 МПа⁹ [19, 20, 21]

Figure 2 – Type of test sample-shaft depending on the load: a – at a load of 0 MPa; b – at a load of up to 270 MPa, c – at a load of 300 MPa [19, 20, 21]

Для оценки исследуемой износостойкости получаемых хромовых покрытий из нового и существующего электролита в сравнении с эталонной парой трения использовали машину трения СМЦ-2М. Испытания проводили по ГОСТ 23.224–86, с целью перевода результатов в цифровой вариант использовали цифровой осциллограф, который показан на рисунке 2, а.

Для испытаний на износостойкость применяли образцы-ролики, которые изготавливались диаметром 49,5...49,6 мм с толщиной 12 мм. В качестве материала использовали сталь 40Х (материал изготовления золотника гидрораспределителя Р-80). Хромировали образцы-ролики на толщину 0,35...0,40 мм с последующим шлифованием до размеров $\varnothing 50^{+0,01}$ мм с шероховатостью 0,16...0,32 мкм (рисунок 2, б, в).

Подготовка к исследованиям на износостойкость образцов-роликов, покрытых хромом, и изготовление образцов-роликов проводилась с использованием оборудования на предприятии Научно-производственное закрытое акционерное общество «Электромаш», расположенное в г. Тирасполе (Приднестровье). Механическая обработка образцов-роликов состояла из следующих операций:

1. Подготовка поверхности под хромовое покрытие. Применяли образец-ролик из заготовки первичной расточкой и последующим шлифованием. Шлифование проводилось до необходимых размеров для достижения шероховатости 0,63...0,32 мкм с использованием оправки от машины трения. Это проводилось для получения необходимой точности и для

исключения лишней механической обработки.

2. Обработка и подготовка образцов-роликов под испытания на машине трения. Для этого использовали операцию шлифования, которая обязательно производилась в оправке от машины трения.

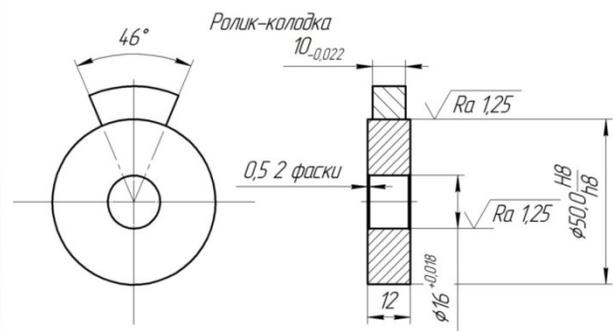
Операции шлифования проходили на шлифовальном станке ЗУ131 на режимах, которые исключали появления дефектов, повреждений обрабатываемых поверхностей для достижения необходимой шероховатости 0,63...32 мкм.

Контртелом (рисунок 3, г) для испытаний на износостойкость использовалась колодка, сделанная из материала, из которого изготавливался корпус гидрораспределителя Р-80 – из серого чугуна СЧ-21 ГОСТ 1412–93. При этом площадь контакта составляла 1 см². При испытании образец-ролик вращался со скоростью оборотов 450 об/мин. Для снижения термического и граничного влияния при приработке и испытании на износостойкость использовали масло М10Г₂, с подачей масла с периодичностью в течении 3-5 мин по одной капле. Применяли для этого специально оборудованную капельницу с микрорегулированием подачи масла, закрепленную на машине трения и с подачей масла по месту контакта пары трения. Для достижения максимального прилегания колодки к образцу-ролику использовали шарнирную опору. Чтобы снижение времени приработки пары трения выполняли подгонку с применением абразивного круга диаметром 50 мм с необходимой зернистостью, который закрепляли на оправке машины трения вместо образца-ролика [21].

⁹ Котомчин А. Н. Совершенствование технологии электролитического хромирования для восстановления деталей автомобилей, работающих при гидроабразивном изнашивании: дис. канд. техн. наук: 05.22.10. М., 2022. 198 с.



а



б



в



г

Рисунок 3 – Машины и приспособления для исследований износостойкости:
а – машина трения СМЦ-2М с осциллографом; б – ролик-колодка с размерами; в – покрытые хромом ролики;
г – колодка с отверстием для термопары (контртело)¹⁰ [21];

Figure 3 – Machines and devices for wear resistance research:
а – SMC-2M friction machine with an oscilloscope, б – roller-pad with dimensions,
с – chrome-plated rollers, d - pad with a hole for a thermocouple (counter body) [21]

Микроструктуру поверхностей пар трения изучали с использованием микроскопа ММУ-3 с приставкой для оцифровки изображения на экране ноутбука. При исследовании микроструктуры проверяли поверхности на качество и состояние – наличие микротрещин, сколов, пригаров и т.п.

При исследовании начального периода износа использовали оборудование для оцифровки – осциллограф, подключенный к аналоговому осциллографу машины трения СМЦ-2М. Измерения проводились автоматически с выводом на экран ноутбука, обработанного сигнала с построением графика износа в реальном времени.

В процессе испытания на износостойкость пары трения колодка-ролик возникла необходимость контроля температуры в месте контакта, что косвенно давало информацию о динамике приработки и процесса износа под нагрузкой (рисунок 4). Кроме того, температура в месте контакта давала информацию о качестве смазки и при необходимости проводилась регулировка подачи масла для уменьшения трения скольжения. Конечным итогом оценки качества приработки являлась стабильность температуры и равномерное пятно места контакта с характерной шероховатостью.

¹⁰ Котомчин А. Н. Совершенствование технологии электролитического хромирования для восстановления деталей автомобилей, работающих при гидроабразивном изнашивании: дис. канд. техн. наук: 05.22.10. М., 2022. 198 с.

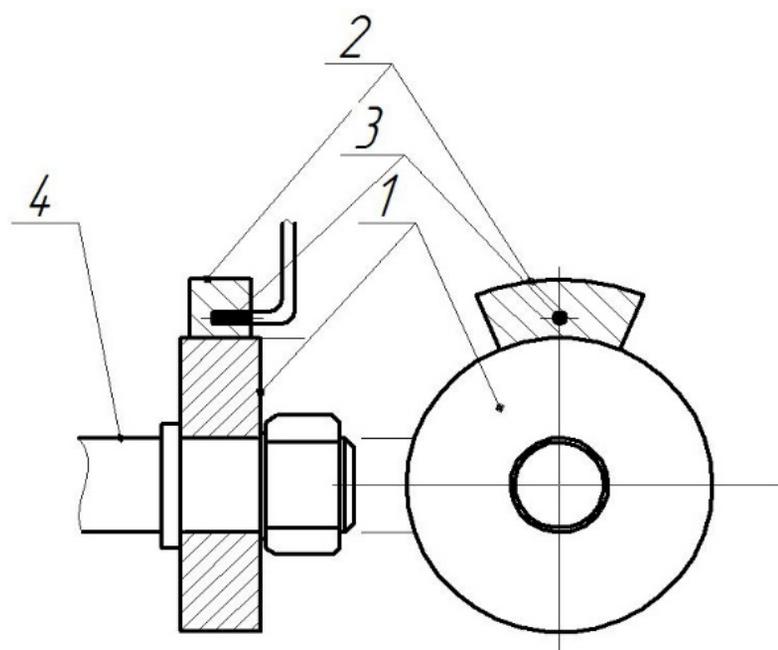


Рисунок 4 – Место контроля температуры в зоне контакта пары трения колодка-ролик:
1 – образец-ролик; 2 – колодка (контртело); 3 – контакт термопары;
4 – оправка машины трения¹¹ [21]

Figure 4 – Temperature control area in the contact zone of the pad-roller friction pair:
1 – sample-roller, 2 – pad (counterbody), 3 – thermocouple contact, 4 – friction machine mandrel [21]

Контроль температуры в области контакта пары трения колодка-ролик выполнялся с помощью термопары 3 (рисунок 3). Оцифровка значений температуры осуществлялась при помощи осциллографа фирмы Hantek 1008, который был подключён к ПК, где формировался график изменения температуры, по которому можно было судить процесс приработки – время, качество, скорость и т.п. [21, 22].

Методику измерения температуры можно увидеть на рисунке 3, из которого видно, что для испытания на износостойкость пары трения ролик-колодка термопара была установлена в отверстие, выполненное в колодке на расстоянии 1–1,5 мм от места контакта, это позволило достичь точного измерения температуры в месте контакта, а также снизить возможность повреждения оборудования от контакта со смазкой и продуктами износа и дать возможность использовать оборудование для оцифровки сигнала. Испытания проводились согласно требованиям ГОСТ Р 8.585–2001. Подключение термопары 3 как датчика температуры производилось к одному из каналов

осциллографа и при помощи программного обеспечения, сигнал оцифровался и выводился на ПК с соответствующими значениями [22].

Перед измерением величины износа необходимо было обязательно промывать образец-ролик и колодку в керосине и в дистиллированной воде и тщательно просушивать. Для измерения величины износа использовался гравиметрический метод, который характеризовался путем измерения массы ролика и колодки через каждые 10 ч испытаний. Для измерения величины износа при испытаниях применялись аналитические весы ВАЛ-200 с точностью измерений 0,0001 г. Значения массы фиксировались с начала приработки.

Исследование поверхности испытуемых пар трения осуществлялось при нагрузке с 10 до 35 кг/см² с шагом изменения нагрузки 5 кг/см². В результате приработки и стабилизированного момента трения площадь контакта не меньше 90% от общей площади. Постепенно увеличивали нагрузку до планируемой во избежание увеличения момента трения.

¹¹ Котомчин А. Н. Совершенствование технологии электролитического хромирования для восстановления деталей автомобилей, работающих при гидроабразивном изнашивании: дис. канд. техн. наук: 05.22.10. М., 2022. 198 с.

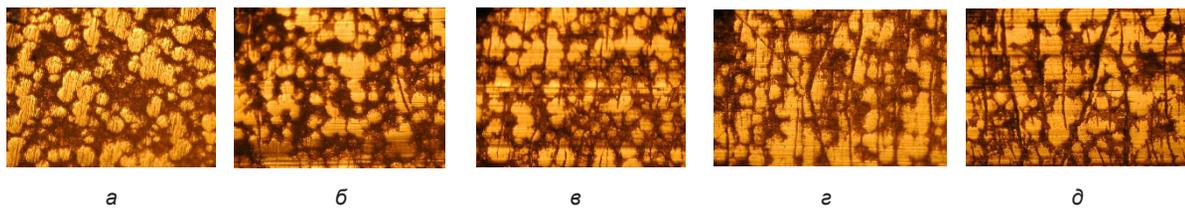


Рисунок 5 – Вид микроструктуры поверхности образца-вала, покрытого хромом: а – до испытания, б – после 3 циклов, в – после 6 циклов, г – после 9 циклов, д – после 12 циклов [21]

Figure 5 – Type of microstructure of the surface of the sample-shaft coated with chromium: а – before the test, б – after 3 cycles, в – after 6 cycles, г – after 9 cycles, д – after 12 cycles [21]

При этом предельно допустимой нагрузкой принималась нагрузка, при которой пара трения переходила в изнашивание с патологической формой¹² [23, 24], которую определяли с помощью микроскопа ММУ-3 с приставкой для оцифровки изображения на экране ноутбука.

Для вычисления коэффициента трения использовали формулу¹³

$$f = \frac{M_{\text{тр}}}{F \cdot r}, \quad (2)$$

где f – коэффициент трения;

$M_{\text{тр}}$ – момент трения, кг·см;

F – внешняя нагрузка на поверхность контакта при трении, кг;

r – радиус образца-ролика, см.

Определяли износ образцов-роликов по формуле

$$i = M_{\text{до}} - M_{\text{после}}, \quad (3)$$

где i – износ образца-ролика, г;

$M_{\text{до}}$ – масса образца-ролика до испытаний, г;

$M_{\text{после}}$ – масса образца-ролика после испытаний, г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования прочности сцепления хромового покрытия, полученного из холодного саморегулирующегося электролита хромирования следующего состава: хромовый ангидрид – 400–450 г/л, сульфат никеля – 10 г/л,

сульфат кобальта – 10 г/л, карбонат кальция – 50–70 г/л, плавиковая кислота – 0,65–0,9 г/л, при режимах осаждения: плотность тока 75–200 А/дм² и рабочая температура электролита 18–35 °С [22, 23, 24].

Результаты исследований прочности сцепления¹⁴ [25, 26, 27, 28, 29] показали, что прочность сцепления хромового покрытия из нового состава позволяет получать хромовые покрытия с прочностью сцепления в пределах 220–270 МПа. При этом поверхность оставалась стабильной, с небольшой деформацией, не влияющей на качество покрытия (см. рисунок 2, б). Дальнейшее увеличение нагрузки на поверхность начинало приводить к постепенному разрушению поверхности и при нагрузке более 300 МПа приводило к скалыванию и отслаиванию (см. рисунок 2, в).

Исследование микроструктуры хромовых покрытий при испытании прочности сцепления показали, что многократная запрессовка-выпрессовка приводила к появлению небольшого количества рисок и царапин, износ по диаметру практически отсутствовал. При этом на качество покрытия все полученные механические воздействия не влияли. На рисунке 5 показано изменение микроструктуры поверхности при 3, 6, 9, 12 количества циклов, при этом разрушение поверхности и скалывание не наблюдались (см. рисунок 5). Данные результаты дали предположение, что хромовые покрытия, получаемые из нового электролита, обладают высокой износостойкостью.

¹² Трение, изнашивание и смазка: справочник: в 2 кн. / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. М.: Машиностроение, 1978. 400 с.

¹³ Исследование трения и износа деталей при ремонте машин и оборудования: методические указания / сост.: А. Т. Лебедев, П. А. Лебедев, А. В. Захарин, Р. В. Павлюк, Ю. И. Жевора, Н. П. Доронина, Н. А. Марьин. Ставрополь: АГРУС Ставропольского гос. аграрного ун-та, 2016. 57 с.

¹⁴ Стратулат М.П. Сцепляемость упрочняющих электролитических хромовых покрытий с чугуной подложкой деталей машин // Сборник материалов IV Международной научно-практической интернет-конференции, «Энерго – и ресурсосбережение – XXI век». Орел: ОрелГТУ, 2006. 156 с.

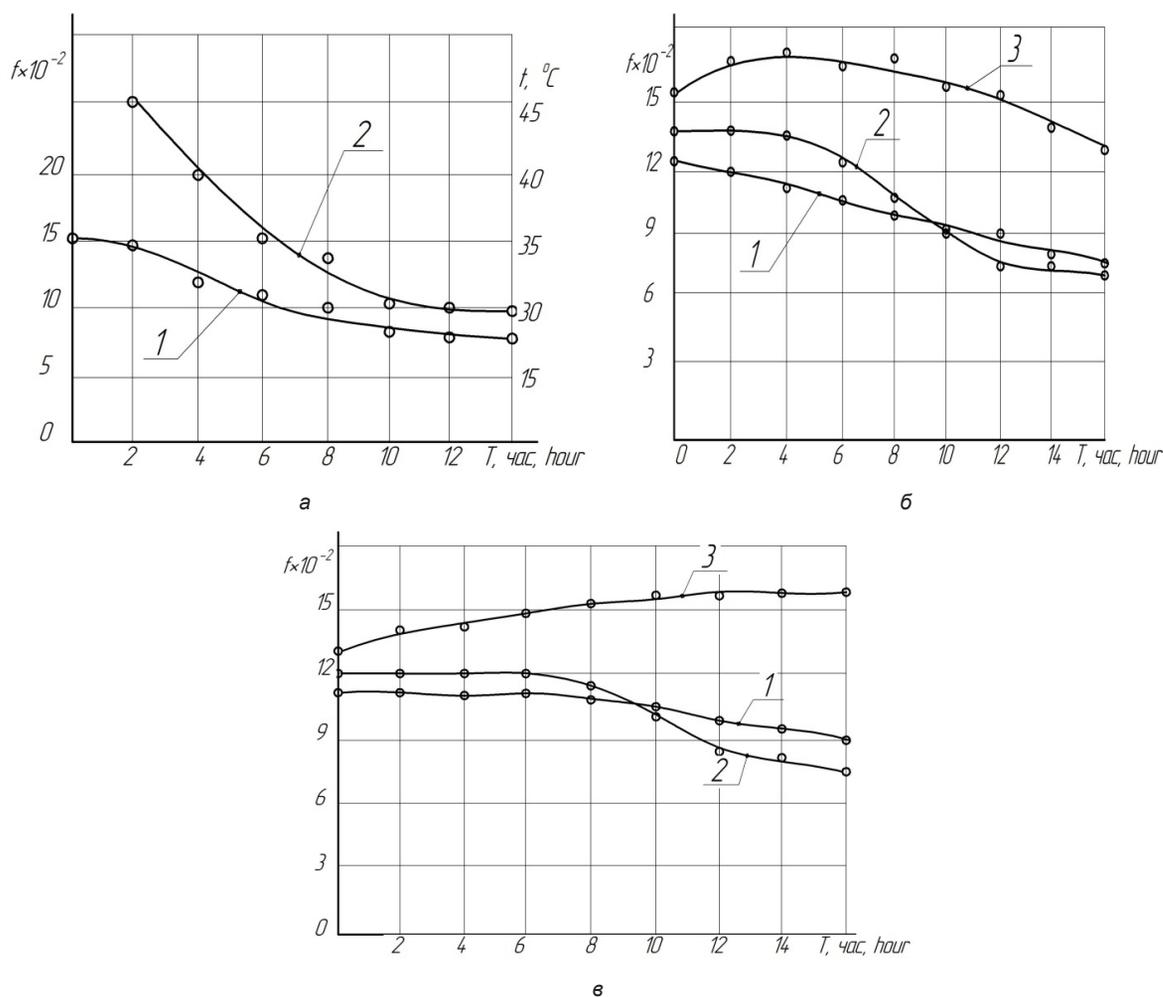


Рисунок 6 – Значение коэффициента трения ($f \times 10^{-2}$) от времени приработки (T) в зависимости от нагрузки: а – при 15 кг/см^2 ; б – при 20 кг/см^2 ; в – при 25 кг/см^2 : 1 – с добавкой плавиковой кислоты, 2 – универсальный электролит; 3 – без добавки HF^{15}

Figure 6 – The value of the coefficient of friction ($f \times 10^{-2}$) from the running-in time (T) depending on the load: а – at 15 kg / cm^2 , б - at 20 kg / cm^2 , с - at 25 kg / cm^2 : 1 – with the addition of hydrofluoric acid, 2 – universal electrolyte; 3 – without HF addition

Дальнейшие исследования подтвердили эти предположения.

Изучение микроструктуры при испытании на прочность сцепления показало, что хромовые покрытия удовлетворительны для деталей автомобилей и дорожно-строительных машин, работающих при гидроабразивном изнашивании. Примером таких деталей являются золотники гидрораспределителей, плунжеры масляных и топливных насосов.

Проведенные исследования нового состава электролита показали, что увеличение количе-

ства плавиковой кислоты в растворе более 1 г/л раствора приводили к снижению прочности сцепления. При испытаниях на прочность сцепления таких хромовых поверхностей приводило к появлению трещин и глубоких царапин и разрушению поверхности, что исключало применение для деталей, работающих при гидроабразивном изнашивании.

Это приводило к нецелесообразности дальнейшего увеличения концентрации плавиковой кислоты.

¹⁵ Котомчин А. Н. Совершенствование технологии электролитического хромирования для восстановления деталей автомобилей, работающих при гидроабразивном изнашивании: дис. канд. техн. наук: 05.22.10. М., 2022. 198 с.

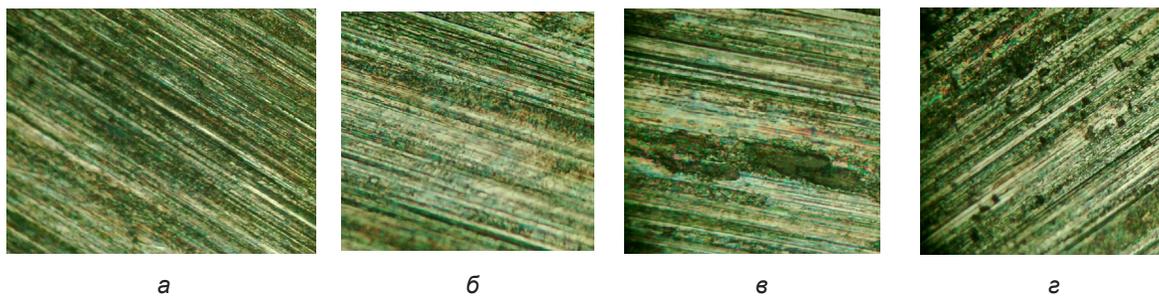


Рисунок 7 – Микроструктура поверхности хромированных ролик-образцов в зависимости нагрузки, кг/см²: а – 10, б – 15, в – 20, г – 25¹⁶

Figure 7 – Microstructure of the surface of chrome-plated sample rollers depending on the load, kg/cm²: a – 10, b – 15, b – 20, g – 25

В результате были сделаны предварительные выводы, что для достижения высокой прочности сцепления и износостойкости необходимо, чтобы концентрация плавиковой кислоты была в пределах 0,65–0,9 г/л.

Дальнейшие исследования износостойкости хромовых покрытий из нового электролита показали, что в начале работы пары трения колодка-ролик происходит их приработка. Приработка является важным этапом для формирования качественной поверхности и от режимов, которой напрямую зависит дальнейшие исследования износостойкости при нагрузке. В результате приработки происходит формирование новой микроструктуры и рельефа поверхности, от которой зависит дальнейшая работа пары трения и её износостойкость¹⁷ (рисунок 6).

Анализ результатов исследований процесса приработки пары трения колодка-ролик показал, что наиболее оптимальная нагрузка – 10–15 кг/см². Исследования микроструктуры приработанных покрытий при данных нагрузках показали, что повреждения не наблюдались, происходило выравнивание неровностей поверхностей при достижении шероховатости в пределах 0,04–0,16 мкм. В результате чего происходит снижение и стабилизация температуры места контакта, а также стабилизация и снижение коэффициента трения (см. рисунок 6).

Дальнейшее увеличения нагрузки приработке до 20 кг/см² приводит к зависимости вида и качества покрытия на условия приработки хромового покрытия (рисунок 6, б). Испытания хромовых покрытий без добавки плавиковой кислоты привели к снижению стабильности температуры и коэффициента трения (рисунок 6, б, кривая 3), также происходили в некоторых случаях повреждения поверхности (рисунок 7, в).

При исследованиях хромовых осадков, получаемых из нового электролита хромирования (см. рисунок 6, б, кривая 1) и у универсального электролита (см. рисунок 6, б, кривая 2), нагрузка приработке 20 кг/см² не приводила к ухудшению качества покрытий, коэффициент трения и температура изначально незначительно росли, а потом параметры приработки стабилизировались. Однако время приработки превышало время чем при нагрузке 10÷15 кг/см².

Дальнейшее увеличение нагрузки до 25 кг/см² у хромированных поверхностей с добавкой плавиковой кислоты (рисунок 6, в, кривая 1) приводило к незначительным повреждениям (рисунок 7, г). Для хромовых покрытий, получаемых без добавки плавиковой кислоты приводило к значительным повреждениям и переходило к паталогическому изнашиванию (см. рисунок 6, в, кривая 3).

¹⁶ Котомчин А. Н. Совершенствование технологии электролитического хромирования для восстановления деталей автомобилей, работающих при гидроабразивном изнашивании: дис. канд. техн. наук: 05.22.10. М., 2022. 198 с.

¹⁷ Тикалов А. В., Ефремов Л. В. Испытания пар трения колодка-диск с применением вибрационных параметров на машине трения // Неделя науки СПбПУ: материалы Научной конференции с международным участием. Лучшие доклады, Санкт-Петербург, 14 – 19 ноября 2016 года. Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2016. С. 95 – 98.

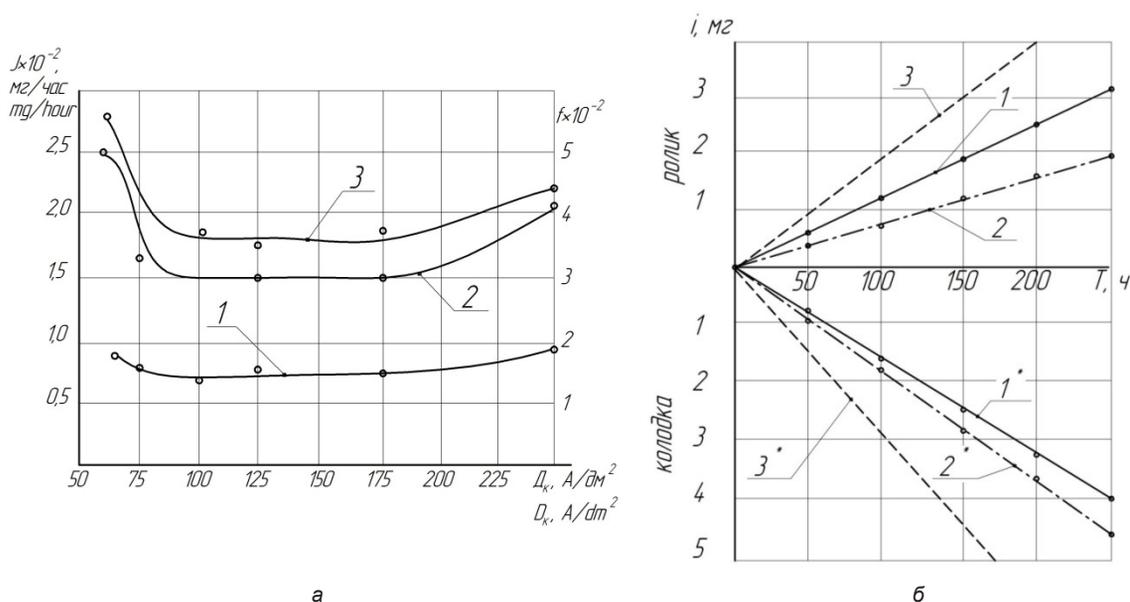


Рисунок 8 – Испытания износостойкости хромовых покрытий:
 а – зависимость катодной плотности тока на процесс изнашивания: 1 – образец-ролик;
 2 – колодка и 3 – коэффициент трения; внешняя нагрузка 100 кг/см²;
 б – изнашивание пар трения ролик-колодка с роликом с различными покрытиями:
 1 – в универсальном электролите; 2 – в разработанном электролите; 3 – без покрытия¹⁸

Figure 8 – The results of studies of the wear resistance of chrome coatings: a – the effect of the cathode current density on the wear intensity: 1 – roller, 2 – counterbody and 3 – coefficient of friction, external load in 100 kg / cm²;
 б – wear of friction pairs roller-pad with roller with various coatings:
 1 – in a universal electrolyte, 2 – in a developed electrolyte, 3 – uncoated

Хромовые покрытия, полученные из универсального электролита, по-прежнему оказались без повреждений (см. рисунок 6, в, кривая 2). Дальнейшее увеличение нагрузки до 30 кг/см² и более приводило к повреждениям всех поверхностей, что исключало дальнейшее использование и исследование.

По окончании приработки пары трения производили постепенное ступенчатое повышение нагрузки до предельно допустимого значения. При анализе процесса приработки было установлено, что наиболее оптимальный процесс приработки происходит при нагрузке 10–15 кг/см², дальнейшее увеличение нагрузки приработки до 20 кг/см² приводило к снижению износостойкости, при снижении верхнего предела допустимой нагрузки испытаний (таблица).

Исследования приработки хромовых покрытий, полученных из нового электролита с добавлением плавиковой кислоты, показали, что повышение нагрузки до 20 кг/см² значение

коэффициента трения стабильное и постепенно начинает со временем снижаться (см. рисунок 6, в).

Приработка при соблюдении данных параметров нагрузок приводила к наименьшей интенсивности изнашивания как образца-ролика, так и колодки. Приработка является подготовительным этапом для установившегося изнашивания, поэтому ее нужно проводить с наибольшей интенсивностью с ограничениями по патологическим процессам, с одной стороны, но, с другой стороны, она должна привести к минимально возможной интенсивности изнашивания при нормальной последующей эксплуатации.

Испытания после приработки под нагрузкой в пределах 50–125 кг/см² показали, что коэффициент трения наименьший, что даёт сделать выводы, что хромовые покрытия обладают высокими антифрикционными свойствами (рисунок 8).

¹⁸ Котомчин А. Н. Совершенствование технологии электролитического хромирования для восстановления деталей автомобилей, работающих при гидроабразивном изнашивании: дис. канд. техн. наук: 05.22.10. М., 2022. 198 с.

Таблица
Средние значения параметров испытаний на износостойкость¹⁹

Table
Average values of wear resistance test parameters

| Вид покрытия | Нагрузка приработки, F, кг/см ² | Значения параметров испытаний | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| | | F _{исп} , кг/см ² | Интенсивность изнашивания, i мг/час | Средний коэффициент трения, f | Рабочая средняя температура, T, °C |
| С добавкой плавиковой кислоты | 15 | 100 | 0,0075 | 0,0278 | 55 |
| Без добавки плавиковой кислоты | 15 | 100 | 0,0110 | 0,0325 | 60 |
| Из универсального электролита | 30 | 100 | 0,0092 | 0,0290 | 55 |

Также исследования влияния катодной плотности в пределах 75–200 А/дм² показали, что изнашивание находится в стабильном состоянии (рисунок 8, а). Дальнейшее увеличение катодной плотности приводит к постепенному снижению износостойкости.

Для наглядного сравнения процесса испытания на износостойкость различных хромовых покрытий, в том числе из нового электролита с добавлением плавиковой кислоты, представлены данные в таблице.

Продолжительные испытания интенсивности изнашивания хромовых покрытий, полученных из нового электролита хромирования, по сравнению с универсальным электролитом, показали, что износостойкость хромовых покрытий из нового электролита на 20–30% выше, чем универсального, а по сравнению с эталонной парой трения на 30–40% (рисунок 8, б). Также из рисунка 8, б видно, что износостойкость колодки в паре трения с образцом-роликом, покрытым хромом из нового электролита, немного уступает при паре с образцом-роликом, покрытым в универсальном электролите. В процессе испытаний происходило изменение микротвёрдости хромового покрытия, которое могло повлиять на изменение износостойкости. Так, после 100 ч испытаний привело к снижению с 11500 до 7500 МПа. Испытания показали, что изменение ми-

кротвёрдости на износостойкость хромового покрытия незначительно повлияло, что подтвердило целесообразность использования способа для восстановления деталей, работающих при гидроабразивном изнашивании.

В результате полученных данных были сделаны выводы, что с увеличением нагрузки интенсивность изнашивания всех поверхностей со временем увеличивается по линейному закону (см. рисунок 8, б).

Было также установлено, что хромовые покрытия, полученные из нового электролита, обладают в 1,6 раз большей износостойкостью по сравнению с эталонной парой трения колодка-ролик. Можно сделать заключение о возможной применимости данного способа для восстановления деталей автомобилей и дорожно-строительной техники, работающих при гидроабразивном изнашивании.

Полученные результаты исследований изнашивания различных хромовых поверхностей удовлетворительно объясняют согласно теории, изложенной в теории внешнего износа и трения²⁰.

ВЫВОДЫ

1. Исследования нового состава электролита показали, что наибольшее влияние на физико-механические свойства хромовых по-

¹⁹ Котомчин А. Н. Совершенствование технологии электролитического хромирования для восстановления деталей автомобилей, работающих при гидроабразивном изнашивании: дис. канд. техн. наук: 05.22.10. М., 2022. 198 с.

²⁰ Трение, изнашивание и смазка: справочник: в 2 кн. / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисына. М.: Машиностроение, 1978. 400 с.

крытий и стабильность осаждения, с целью получения качественных покрытий, оказывает плавиковая кислота. Наиболее оптимальное количество плавиковой кислоты составило в пределах 0,65–0,9 г/л.

2. Установлено, что в предлагаемом растворе можно получать покрытия толщиной до 0,5 мм, обладающие практически одинаковыми свойствами как по толщине, так и в зависимости от катодной плотности тока в интервале от 75 до 200 А/дм².

3. Определены условия приработки хромо-вых покрытий, обеспечивающие формирование рабочего рельефа поверхностей трения без их повреждений, минимизацию коэффициента трения и интенсивность изнашивания.

4. Выявлены преимущества осадков хрома в электролите с добавкой HF и прошедших приработку при внешней нагрузке до 20 кг/см² (по сравнению с покрытиями из электролита без добавки и универсального):

а) обладают наибольшей износостойкостью и лучшими антифрикционными свойствами;

б) изменение плотности тока в пределах от 75 до 200 А/дм² не влияет на величину износа.

5. Износостойкость осадков, полученных в электролите с добавкой плавиковой кислоты, не уступает износостойкости хрома, осаждаемого в универсальной ванне, а по сравнению с эталонной парой трения выше на 2–30%.

6. Выполненные исследования прочности сцепления и износостойкости показали, что полученные результаты подтвердили использование для восстановления деталей автомобилей и дорожно-строительных машин, работающих при гидроабразивном изнашивании, примером из которых являются золотники гидрораспределителей, плунжеры гидравлических и топливных насосов и др.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Котомчин А. Н., Синельников А. Ф., Корнейчук Н. И. К вопросу выбора способа восстановления деталей машин. *Вестник СибАДИ*. 2020; 17 (1): 84 – 97. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-84-97>

2. Корнейчук Н. И., Лялякин В. П. Перспективы использования промышленных методов восстановления изношенных деталей машин гальваническими и полимерными покрытиями в современных условиях развития агропромышленного технического сервиса // *Труды ГОСНИТИ*. 2018. № 130. С. 254 – 265.

3. Котомчин А. Н., Ляхов Ю. Г. Анализ отказов узлов и агрегатов строительных, дорожных, подъ-

емно-транспортных машин и специальных автомобилей на примере МУП «КоммуналДорСервис» г. Бендеры // *Вестник Приднестровского университета*. Серия: Физико-математические и технические науки. Экономика и управление. 2019. № 3 (63). С. 174 – 178.

4. Мухаметшина Р. М. Отказы дорожно-строительных машин по параметрам коррозии // *Известия КГАСУ*. 2013. № 4 (26). С. 403 – 408.

5. Мухаметшина Р. М. Трибологические отказы дорожно-строительных машин // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. Т.18, 2016. № 1 (2). С. 252 – 255.

6. Густов Ю. И. Исследование конструкционно-технологических и эксплуатационных показателей строительной техники // *Известия КГАСУ*. 2014. № 4 (30). С. 470 – 475.

7. Шлугер М. А., Ток Л. Д. Новые электролиты для покрытий хромом и его сплавами // *Журнал Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева*. 1988. Т. 32, № 3. С. 297 – 305.

8. Стратулат М. П. Восстановление деталей машин электрохимическим хромированием: монография. Орел: издательство ОрелГТУ, 2009. 246 с.

9. Елинек Т. В. Успехи гальванотехники. Обзор мировой специальной литературы за 2017–2018 годы // *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2019. Том 27, № 3. С. 4 – 14.

10. Елинек Т. В. Успехи гальванотехники. Обзор мировой специальной литературы за 2016 – 2017 годы // *Гальванотехника и обработка поверхности*. 2018. Том 26, № 1. С. 4 – 10.

11. Bolch T., Linde R., Metzner M., Müll K. Innovative Oberflächenstrukturen durch elektrochemische Beschichtungsverfahren // *Galvanotechnik*. 2005. № 103. pp. 2095 – 2100.

12. Distelrath A. Jakob, C. Investigation of structured electrodeposition of hard chromium coatings // *Information technology and electrical engineering - devices and systems, materials and technologies for the future*. Ilmenau: 2009. pp. 379.

13. Distelrath-Lübeck A. Untersuchung des Einflusses von Methansulfonsäure auf die Chromabscheidung aus Chromsäure-elektrolyten // *Galvanotechnik*. 2011. № 102. pp. 2647 – 2657.

14. Metzner M., Bolch T., Linde R., Müll K. Nasse Kombinationen – Funktionelle Oberflächen durch elektrochemische In-situ-Strukturierung // *Metalloberfläche*. 2003. № 57. pp. 18 – 22.

15. Kotomchin A. N., Zorin V. A. Study of High-Performance Chromium Electrolyte for Restoration of Automobile and Road-Construction Machinery Parts // *2021 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex, TIRVED 2021 - Conference Proceedings, Moscow, 11–12 November 2021. Moscow, 2021. DOI 10.1109/TIRVED53476.2021.9639216*.

16. Chromabscheidung aus wässrigen Lösungen // *Chromsaurelösungen Galvanotechnik*. 2005. № 9. Т. 1. pp. 2063 – 2071.

17. Корнейчук Н. И. Перспективы интенсификации восстановления деталей машин электролитическим хромированием // Труды ГОСНИТИ. 2010. Т. 106. С. 197 – 203.

18. Шишурин С. А., Семочкин В. С., Сафонов В. В., Гурьев А. Е. Структура и физико-механические свойства композиционных гальванохимических покрытий // Вестник АПК Ставрополя. 2014. № 3. С. 77 – 80.

19. Котомчин А. Н. Влияние электрохимической обработки на прочность сцепления с подложкой при восстановлении деталей автотранспорта, работающих при гидроабразивном изнашивании. *Вестник СибАДИ*. 2022; 19 (4): 546–559. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-546-559>

20. Котомчин А. Н., Синельников А. Ф., Корнейчук Н. И. Использование износостойкого хромирования при восстановлении и упрочнении деталей автомобилей // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2021. № 1(64). С. 11 – 17.

21. Котомчин А. Н., Янута А. С., Артёменко А. И. Проведение трибологических испытаний образцов, покрытых гальваническими износостойкими покрытиями, на машине трения СМЦ-2 // Вестник Приднестровского университета. Серия: Физико-математические и технические науки. Экономика и управление. 2020. № 3 (66). С. 127 – 132.

22. Korolev A. V., Korolev A. A. Friction machine for accelerated wear tests of frictional rolling elements // *Journal of Friction and Wear*. 2017. Vol. 38, No. 1. P. 77-81. DOI 10.3103/S1068366617010068.

23. Buyanovskii I. A., Pravotorova E. A., Bolshakov A. N., Levchenko V. A. Minimizing the number of experimental tribological tests on the friction machine of reciprocating motion // *Journal of Friction and Wear*. 2017. Vol. 38, No. 3. P. 190 – 194. DOI 10.3103/S1068366617030059.

24. Машков В. Н. Трибологические испытания пар трения с многофункциональными покрытиями // *Технология машиностроения*. 2016. № 1. С. 15 – 18.

25. Zhao J., Li Y., Liu Y. [et al.] Friction and wear performances of impregnated graphite in ring-on-ring tribological test // *Tribology International*. 2022. Vol. 174. P. 107715. DOI 10.1016/j.triboint.2022.107715.

26. Harsha A. P., Wäsche R., Joyce T. J. Friction and wear of two polyethylenes under different tribological contact conditions // *Polymers and Polymer Composites*. 2020. DOI 10.1177/0967391120920130.

27. Корнейчук Н. И. Влияние условий термообработки на физико-механические свойства хромовых покрытий // Вестник Приднестровского университета. Серия: Физико-математические и технические науки. Экономика и управление. 2015. № 3(51). С. 103 – 109.

28. Корнейчук Н. И. Оценка контактной усталостной прочности износостойких гальванических покрытий, применительно к восстановлению деталей машин // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 128. С. 152 – 161.

29. Корнейчук Н. И. Приработка электролитических хромовых покрытий // Труды ГОСНИТИ. 2010. Т. 105. С. 170–175.

REFERENCES

1. Kotomchin A. N., Sinelnikov A. F., Korneychuk N. I. Restoration of machine parts: choice of the method. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (1): 84 – 97. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-84-97>

2. Korneychuk N. I., Lyalyakin V. P. Perspektivy ispolzovaniya industrialnykh metodov vosstanovleniya iznoshennykh detalej mashin galvanicheskimi i polimernymi pokrytiami v sovremennykh usloviyakh razvitiya agropromyshlennogo tehničeskogo servisa. [Prospects of using industrial methods of restoration of worn-out machine parts by electroplating and polymer coatings in modern conditions of development of agro-industrial technical service] *Trudy GOSNITI*. 2018;130: 254 – 265. (In Russ.)

3. Kotomchin A. N., Lyahov Yu. G. Analiz otkazov uzlov i agregatov stroitelnykh, dorozhnykh, podemno-transportnykh mashin i specialnykh avtomobilej na primere MUP «KommunalDorServis» g. Bendery [Analysis of failures of components and aggregates of construction, road, lifting and transport machines and special vehicles on the example of Municipal Unitary Enterprise «Kommunaldorservice» Bendery] *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tehničeskie nauki. Ekonomika i upravlenie*. 2019; 3 (63): pp. 174 – 178. (In Russ.)

4. Muhametshina R. M. Otkazy dorozhno–stroitelnykh mashin po parametram korrozii [Failures of road construction machines by corrosion parameters]. *Izvestiya KGASU*. 2013; 4:403 – 408. (In Russ.)

5. Muhametshina R. M. Tribologicheskie otkazy dorozhno–stroitelnykh mashin [Tribological failures of road–building machines]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. Vol.18. 2016; 1(2): 252 – 255. (In Russ.)

6. Gustov Yu. I. Issledovanie konstrukcionno–tehnologicheskikh i ekspluatacionnykh pokazatelej stroitelnoj tehniki [Research of structural, technological and operational indicators of construction equipment]. *Izvestiya KGASU*. 2014; 4(30): 470 – 475. (In Russ.)

7. Shluger M. A., Tok L. D. Novye elektrolity dlya pokrytij hromom i ego splavami [New electrolytes for coatings with chromium and its alloys]. *Zhurnal Vsesoyuznogo himicheskogo obshestva im. D. I. Mendeleeva*. 1988; Vol.32; 3:297 – 305. (In Russ.)

8. Stratulat M. P. Vosstanovlenie detalej mashin elektrohimičeskim hromirovaniem [Restoration of machine parts by electrochemical chrome plating] *Monografiya*. Orel: izdatelstvo OrelGTU, 2009: 246. (In Russ.)

9. Elinek T. V. *Uspehi gal'vanotekhniki. Obzor mirovoj special'noj literatury za 2017–2018 gody* [Advances in electroplating. Review of world special literature for 2017 – 2018]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*; Vol. 27, 2019, No 3: 4 – 14. (In Russ.)

10. Elinek T. V. *Uspehi gal'vanotehniki. Obzor mirovoj special'noj literatury za 2016–2017 gody* [Advances in electroplating. Review of world special literature for 2016–2017]. *Gal'vanotehnika i obrabotka pov-erhnosti*; Vol. 26, 2018, No 1: 4 – 10. (In Russ.)
11. Bolch, T., Linde, R., Metzner, M., Müll, K.: Innovative surface structures through electrochemical coating processes. *Galvanotechnik* 103 (2005): 2095 – 2100.
12. Distelrath A. Jakob, C. Investigation of structured electrodeposition of hard chromium coatings. In: Information technology and electrical engineering - devices and systems, materials and technologies for the future. Ilmenau: 2009: 379.
13. Distelrath-Lübeck, A.: study of the influence of Methanesulfonic acid on Chromium deposition from chromic acid electrolytes. *Electro Technology* 102 (2011): 2647 – 2657.
14. Metzner, M., Bolch, T., Linde, R., Müll, K.: wet combinations-functional surfaces by electrochemical in-situ structuring. *Metal Surface* 57 (2003) Nr. 9: 18 – 22.
15. Kotomchin A. N., Zorin V. A. Study of High-Performance Chromium Electrolyte for Restoration of Automobile and Road-Construction Machinery Parts // 2021 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex, TIRVED 2021 - Conference Proceedings, Moscow, 11 – 12 November 2021. Moscow, 2021. DOI 10.1109/TIRVED53476.2021.9639216.
16. Chromabscheidung aus wässrigen Lösungen. Chromsaurelösungen *Galvanotechnik*. 2005; 9. Vol.1: 2063 – 2071.
17. Kornejchuk N. I. Perspektivy intensivatsii vosstanovleniya detalej mashin elektroliticheskim hromirovaniem [Prospects of intensification of restoration of machine parts by electrolytic chrome plating]. *Trudy GOSNITI*. 2010; 106: 197 – 203. (In Russ.)
18. Shishurin S. A., Semochkin V. S., Safonov V. V., Gurev A. E. Struktura i fiziko-mehaniicheskie svoystva kompozitsionnykh galvanohimicheskikh pokrytij [Structure and physico-mechanical properties of composite galvanochemical coatings]. *Vestnik APK Stavropolya*. 2014; 3: 77 – 80.
19. Kotomchin A. N. Effect of electrochemical treatment on substrate adhesion strength in the restoration of motor vehicle parts operating under hydroabrasive wear. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (4): 546 – 559. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-546-559>
20. Kotomchin A. N., Sinelnikov A. F., Kornejchuk N. I. Ispolzovanie iznosostojkogo hromirovaniya pri vosstanovlenii i uprochnenii detalej avtomobilej [The use of wear-resistant chrome plating in the restoration and hardening of car parts] *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta (MADI)*. 2021. № 1(64): pp. 11 – 17. (In Russ.)
21. Kotomchin A. N., Yanuta A. S., Artyomenko A. I. Provedenie tribologicheskikh ispytanij obrazcov, pokrytykh galvanicheskimi iznosostojkimi pokrytijami, na mashine treniya SMC-2 [Conducting tribological tests of samples coated with galvanic wear-resistant coatings on the SMC-2 friction machine]. *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematičeskie i tehničeskie nauki. Ekonomika i upravlenie*. 2020; 3 (66): 127–132. (In Russ.)
22. Korolev A. V., Korolev A. A. Friction machine for accelerated wear tests of frictional rolling elements // *Journal of Friction and Wear*. 2017; Vol. 38, No. 1: 77 – 81.
23. Buyanovskii I. A., Pravotorova E. A., Bolshakov A. N., Levchenko V. A. Minimizing the number of experimental tribological tests on the friction machine of reciprocating motion. *Journal of Friction and Wear*. 2017; Vol. 38, No. 3: 190 – 194.
24. Mashkov V. N. Tribologičeskie ispytaniya par treniya s mnogofunkcionalnymi pokrytijami [Tribological testing of friction pairs with multifunctional coatings]. *Tehnologiya mashinostroeniya*. 2016; 1: 15 – 18.
25. Zhao J., Li Y., Liu Y. [et al.] Friction and wear performances of impregnated graphite in ring-on-ring tribological test. *Tribology International*. 2022; Vol. 174:107715.
26. Harsha A. P., Wäsche R., Joyce T. J. Friction and wear of two polyethylenes under different tribological contact conditions. *Polymers and Polymer Composites*. 2020.
27. Kornejchuk N. I. Vliyanie uslovij termoo-brabotki na fiziko-mehaničeskie svoystva hromovykh pokrytij [Influence of heat treatment conditions on the physical and mechanical properties of chrome coatings]. *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematičeskie i tehničeskie nauki. Ekonomika i upravlenie*. 2015; 3 (51): 103 – 109. (In Russ.)
28. Kornejchuk N. I. Ocenka kontaktnoj ustalostnoj prochnosti iznosostojkikh galvanicheskikh pokrytij, primenitelno k vosstanovleniyu detalej mashin [Evaluation of the contact fatigue strength of wear-resistant electroplating coatings, in relation to the restoration of machine parts]. *Trudy GOSNITI*. 2017; Vol. 128: 152 – 161. (In Russ.)
29. Kornejchuk N. I. Prirabotka elektroliticheskikh hromovykh pokrytij [Running-in of electrolytic chrome coatings]. *Trudy GOSNITI*. 2010; 105: 170 – 175. (In Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Котомчин А. Н. Основная работа по исследованию и сбору информации для составления статьи.

Зорин В. А. Методическое и научное сопровождение при подготовке статьи, получение достоверных результатов исследований и их подтверждение.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Aleksei N. Kotomchin. The main work on research and accumulation of information for the preparation of the article.

Vladimir A. Zorin. Methodological and scientific support in the preparation of the article, obtaining reliable research results and their confirmation.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Котомчин Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Инженерные науки, промышленность и транспорт». SPIN-код: 9826-9350.

Зорин Владимир Александрович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин». SPIN-код: 5612-1652.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksei N. Kotomchin. Cand. of Sci., Associate Professor of the Engineering Sciences, Industry and Transport Department. SPIN-код: 9826-9350.

Vladimir A. Zorin – Dr. of Sci., Professor, Production and Repair of Cars and Road Vehicles Department. SPIN-код: 5612-1652.