

УДК 621.757

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-546-559>

EDN: PYNRLX

Научная статья



ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ С ПОДЛОЖКОЙ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАНСПОРТА, РАБОТАЮЩИХ ПРИ ГИДРОАБРАЗИВНОМ ИЗНАШИВАНИИ

А. Н. Котомчин*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва, Россия;**Приднестровский государственный университет им. Т. Г. Шевченко, Молдова, Приднестровье, г. Тирасполь
aleshka81@list.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4750-525>*

АННОТАЦИЯ

Введение. В процессе хромирования деталей автомобилей необходимо получать хромовые покрытия с высоким качеством с заданными физико-механическими свойствами. Поэтому электрохимическая обработка перед нанесением покрытий играет решающую роль в процессе формирования покрытий с высокой контактной прочностью и износостойкостью. Исследование процесса электрохимической обработки позволит разработать рекомендации для получения качественных покрытий при восстановлении деталей автотранспорта.

Материалы и методы. Для проведения достоверных исследований применялось необходимое оборудование, которое позволяло получать данные с нужной точностью. Также для проведения математической обработки использовались современные средства обработки данных, которые исключали возможность ошибки и тем самым получить зависимости факторов с необходимой точностью.

Результаты. При использовании разработанного нового электролита хромирования возникла необходимость проведения исследований режимов и времени проведения электрохимической обработки перед нанесением покрытия деталей, изготовленных из сталей, содержащих хром, и упрочненных закалкой до твердости HRC 55–60. Исходя из полученных результатов было выявлено, что наибольшая прочность сцепления будет при использовании электрохимического травления с плотностью тока 130–140 А/дм² и времени выдержки 60–70 с. Также необходима активация в самом растворе хромирования с анодной плотностью тока 70–80 А/дм² и время проведения 30–40 с, с резким переключением на режим хромирования. Сделаны выводы по оптимизации электрохимической обработки поверхности перед хромированием с целью получения наибольшего сцепления с подложкой.

Обсуждение и заключение. В результате проведенных исследований электрохимической обработки детали перед хромированием получено, что при восстановлении деталей, работающих при гидроабразивном изнашивании, необходимо соблюдать заданные условия для получения качественных покрытий с высокой прочностью сцепления с сохранением высоких физико-механических свойств покрытия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: хромирование, прочность сцепления, электрохимическое травление, активирование, уравнение регрессии, время выдержки, плотность тока, оптимизация, подложка.

БЛАГОДАРНОСТИ. Благодарность рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 03.07.2022; одобрена после рецензирования 26.07.2022; принята к публикации 27.07.2022.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Котомчин А. Н. Влияние электрохимической обработки на прочность сцепления с подложкой при восстановлении деталей автотранспорта, работающих при гидроабразивном изнашивании // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 4 (86). С. 546-559. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-546-559>

© Котомчин А. Н., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-546-559>
EDN: PYNRLX

EFFECT OF ELECTROCHEMICAL TREATMENT ON SUBSTRATE ADHESION STRENGTH IN THE RESTORATION OF MOTOR VEHICLE PARTS OPERATING UNDER HYDROABRASIVE WEAR

Aleksei N. Kotomchin

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

*Pridnestrovian State University named after T. G. Shevchenko
Tiraspol, Moldova*

aleshka81@list.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4750-525>

ABSTRACT

Introduction. In the process of chrome plating of car parts, it is necessary to obtain high-quality chrome coatings with specified physical and mechanical properties. Therefore, electrochemical treatment before coating plays a crucial role in the formation of coatings with high contact strength and wear resistance. The study of the electrochemical treatment process will make it possible to develop recommendations for obtaining high-quality coatings when restoring vehicle parts.

Materials and methods. To conduct reliable research, the necessary equipment was used, which made it possible to obtain data with the necessary accuracy. Also, modern data processing tools were used to carry out mathematical processing, which excluded the possibility of error and thereby obtain the dependences of factors with the necessary accuracy.

Results. When using the developed new chromium plating electrolyte, it became necessary to conduct studies of the modes and time of electrochemical treatment before coating parts made of steels containing chromium and hardened to HRC 55-60 hardness. Based on the results obtained, it was found that the greatest adhesion strength will be when using electrochemical etching with a current density of 130-140 A/dm² and a holding time of 60-70 s. It is also necessary to activate in the chrome plating solution itself with an anode current density of 70-80 A/dm² and a time of 30-40 s, with a sharp switch to the chrome plating mode. Conclusions are drawn on the optimization of electrochemical surface treatment before chrome plating, in order to obtain the greatest adhesion to the substrate.

Discussion and conclusion. As a result of the conducted studies of the electrochemical processing of the part before chrome plating, it was possible to obtain that when restoring parts operating under waterjet wear, it is necessary to observe the specified conditions for obtaining high-quality coatings with high adhesion strength while maintaining high physical and mechanical properties of the coating.

KEYWORDS: chrome plating, adhesion strength, electrochemical etching, activation, regression equation, exposure time, current density, optimization, substrate.

ACKNOWLEDGMENTS. Thanks to the reviewers of the article.

The article was submitted 03.07.2022; approved after reviewing 26.07.2022; accepted for publication 27.07.2022.

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: Kotomchin Aleksei 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. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-546-559>

© Kotomchin A. N., 2022



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

ВВЕДЕНИЕ

Специализированный автотранспорт эксплуатирует для управления рабочими процессами гидропривод. Из источника [1] известно, что наибольший процент неисправностей гидропривода приходится на гидрораспределители и гидронасосы, у которых ресурсопределяющими деталями являются золотники и плунжера. Даже незначительный износ их приводит к потере работоспособности агрегата и автомобиля в целом.

В основном восстановление деталей, работающих при гидроабразивном изнашивании, на предприятиях, эксплуатирующих специализированный автотранспорт, не производится. При ремонте агрегатов гидропривода происходит замена на новые или заранее отремонтированные, что увеличивает стоимость эксплуатации в целом. Поэтому восстановление деталей в условиях отсутствия оригинальных деталей становится востребованным и экономически целесообразным.

Хромирование – один из способов электрохимического наращивания хрома, который используют для упрочнения или восстановления деталей автотранспорта и дорожно-строительных машин. Хром обладает достаточно хорошими свойствами – износостойкостью, высокой твердостью, стойкостью к низким температурам, отсутствием термического влияния на поверхности детали, хорошим сцеплением с основой детали и т. д. [2, 3].

Однако при разработке новых электролитов, при которых используют различные органические и неорганические добавки, возникает дополнительная потребность в исследованиях прочности сцепления с основной поверхностью детали, в особенности деталей, изготовленных из стали с добавлением хрома при последующей закалке.

В результате проведенного литературного анализа было выявлено, что основными операциями, влияющими на прочность сцепления, являются электрохимическое травление и активирование.

Поэтому электрохимическое травление используют с целью ускорения процесса травления и повышения прочности сцепления электролитических хромовых покрытий. Оно отличается от химического тем, что процесс происходит при пропускании через детали и

раствор электрического постоянного тока от внешнего источника, при этом скорость травления увеличивается в десятки раз, уменьшается расход кислоты [4, 5].

Для травления черных металлов обычно используют растворы кислот, чаще серной, и солей соответствующих металлов. Детали закладывают в ванну и включают в качестве катода или анода в электрическую цепь. Различают катодное и анодное травление.

Наиболее распространенным считается анодное травление. Оно происходит за счет электрохимического растворения металла, химического растворения и механического отрывания оксидов от поверхности металла выделяющимся на аноде кислородом. Обычно для анодного травления стали применяют серную кислоту концентрации 200...250 г/л или подкисленные растворы сульфата или хлорида железа¹. Температура электролитов 20...60 °С, анодная плотность тока 5... 10 А/дм² [5, 6].

Обычно катодами при травлении в серно-кислом электролите служит свинец, а в хлористом – сталь. Продолжительность обработки зависит от состояния поверхности и режимов травления (чем выше температура раствора и плотность тока, тем больше скорость травления) и колеблется от 0,5 до 5 мин. Частицы шлама с поверхности металла удаляют так же, как и при химическом травлении.

Известно, что при катодном травлении на поверхности изделия бурно выделяется водород, который частично восстанавливает оксиды, разрыхляет их пленку и механически отрывает ее от поверхности металла. При этом исключается опасность перетравления, однако происходит наводороживание поверхности (но значительно меньше, чем при химическом травлении), что повышает хрупкость и снижает сцепляемость покрытия. Кроме того, при катодном травлении процесс продолжается в 1,5 раза дольше, чем при анодном. Для предохранения стали от наводороживания применяют специальные растворы, содержащие соли свинца или олова. Иногда попеременно включают изделия в качестве катода и анода (или наоборот)². При такой обработке используют противоположные стороны катодного и анодного процессов, что ускоряет травление, способствует уменьшению наводороживания и образования шлама [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14].

¹ Котомчин А. Н., Синельников А. Ф., Корнейчук Н. И. Сравнительная характеристика электролитов хромирования для восстановления и упрочнения деталей машин // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2020. № 7. С. 50–55.

² Петров Ю. Н., Корнейчук Н. И. [и др.] Прогрессивные способы восстановления деталей машин и повышения их прочности // Межвузовский сборник научных трудов. Кишинёв: Кишиневский сельскохозяйственный институт им. М. В. Фрунзе, 1979. С. 48–51.



Рисунок 1 – Образцы для исследования прочности сцепления на различных режимах
Источник: составлено автором.

Figure 1 – Samples for the study of adhesion strength in various modes
Source: compiled by the author.

Активация – обработка поверхности покрываемого металла химическим или электрохимическим способом для снятия окисного слоя непосредственно перед получением покрытия. Она представляет собой окончательную операцию подготовки деталей, заключающуюся в легком травлении их поверхности и обеспечивающую высокую прочность сцепления покрытий. Ее проводят непосредственно перед погружением деталей в гальваническую ванну для покрытия или в самой ванне.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБОРУДОВАНИЕ

В качестве исследований был взят разработанный электролит хромирования состава: 420 г/л хромового ангидрида, 50 г/л карбоната кальция, 10 г/л сульфата никеля, 10 г/л сульфата кобальта и 0,65–0,9 г/л плавиковой кислоты [6].

В качестве образцов для исследований использовали стержни диаметром 10 мм, изготовленных из стали 40Х и закаленных до твердости HRC 55...60 (рисунок 1).

Травление проводили в электролите с содержанием 365 г/л серной кислоты (30%-ный раствор) и 15...20 г/л сернистого железа

($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) плотностью 1,23 г/см³ при температуре 18...25 °С. Для приготовления растворов рабочую ванну заполняли водой до половины объема. Затем осторожно добавляли серную кислоту при перемешивании, после чего ванну доливали водой до рабочего уровня.

Детали навешивали на анодную специальную подвеску. Катодными служили свинцовые пластины, площадь которых в 3...4 раза больше площади покрываемых поверхностей деталей. Стальные изделия обрабатывали при анодной плотности тока 20...150 А/дм² в течение 20...120 мин, используя специальную установку для поддержания необходимых режимов [15].

При данных режимах через некоторое время после начала травления напряжение на ванне повышается, а сила тока снижается. Это объясняется переходом металла из активного состояния в пассивное (пассивирование поверхности) и сопровождается бурным выделением кислорода. Пузырьки кислорода срывают травильный шлам, и обрабатываемая поверхность становится чистой, с отчетливо выявленной кристаллической структурой и специфическим микрорельефом³ [16, 17, 18, 19, 20].

³ Петроченкова И. В., Помогаев В. М., Волкович А. В. Особенности влияния температуры на рассеивающую способность электролитов // Сб. научных трудов: Успехи в химии и химической технологии. Новомосковск: НИ РХТУ, 2004. С. 44–51.

Контроль за качеством анодной обработки проводили визуально по изменению цвета. Нормально протравленная поверхность светло-серого, матового цвета, металлический блеск на отдельных участках или всей поверхности свидетельствует о недостаточной обработке, а тёмные полосы, чёрные точки на тёмно-сером общем фоне поверхности – о её перетравливании.

Активирование осуществляли непосредственно в растворе хромирования известного состава, при этом изменяли количество плавиковой кислоты и время активации. При этом определяли прочность сцепления с изменением параметров проведения процесса. Режимы проведения активации изменяли при анодной плотности тока 20...100 А/дм² в течение 10...60 с при температуре электролита 18...35 °С.

В процессе эксплуатации состав электролита изменялся. В нем постепенно накапливалось железо (при травлении деталей из черных металлов) и уменьшалась концентрация кислоты, в результате этого снижается скорость травления. Кроме того, вследствие испарения и уноса электролита деталями изменяется его концентрация и уровень. С помощью ареометра проверяли концентрацию электролита и, если необходимо, добавляли кислоту или воду.

При нарушении нормальной работы состав электролита травления проверяли химическим анализом [20, 21, 22].

Прочность сцепления измеряли с помощью матрицы и пресса гидравлического на 10 т. При этом прочность определялась исходя из давления, при котором происходило разрушение или повреждение хромового покрытия.

Математическую обработку полученных результатов исследований проводили с помощью программы Statistica.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При проведении исследований было получено, что наилучшую прочность сцепления хромовых покрытий с закалённой сталью 40Х можно получить после двукратной анодной обработки поверхностей деталей: электрохимического травления в разбавленной серной кислоте и активирования в рабочем растворе электролита хромирования. При этом существенное влияние на прочность сцепления оказывают режимы анодной обработки – продолжительность травления, анодная плотность тока. Кроме того, при проведении ак-

тивирования в рабочем растворе влияние на прочность сцепления оказывает количество плавиковой кислоты, которая может варьироваться в пределах 0,6–0,9 г/л [22].

Предварительными исследованиями, проведёнными нами, была выбрана оптимальная анодная плотность тока 120 А/дм² при травлении в сернокислой ванне. При плотности анодного тока от 130 до 160 А/дм² продолжительность эффективного травления до начала перетравливания поверхности составляла соответственно 60 и 40 с. В интервале плотностей тока 100–120 А/дм² осуществляли травление поверхности без видимых следов перетравливания в течение 90–120 с. Снижение анодной плотности тока от 100 до 60 А/дм² приводило к увеличению времени травления от 120 до 180 с соответственно, причем цвет обрабатываемой поверхности за всё время травления оставался серым, ближе к тёмно-серому. Дальнейшее снижение анодной плотности тока до 20 А/дм² приводило к увеличению длительности травления до 7 мин, причём на протяжении первых 90 с поверхность имела явно выраженный металлический блеск, свидетельствующий о неэффективности анодного травления. В целях плавности управления процессом и повышения эффективности анодного травления нами была выбрана плотность 120 А/дм².

В результате проведенных исследований было получено, что при этой плотности тока максимальное значение прочности сцепления достигается при продолжительности анодной обработки 30 с и достигает значения 285 МПа (рисунок 2). Дальнейшее увеличение продолжительности анодного травления приводит к снижению прочности на срез до 195 МПа. С целью обеспечения наилучшей сменяемости покрытий с основой продолжительность обработки должна составлять 30–40 с.

При проведении исследований влияния продолжительности и анодной плотности тока активирования на сцепляемость хромовых покрытий, осаждённых из разработанного электролита с добавкой плавиковой кислоты, проводили непосредственно в ванне хромирования при концентрации неорганической добавки плавиковой кислоты 0,8 г/л. Предварительно осуществляли анодное травление образцов в ванне травления при плотности тока 120 А/дм², температуре 20 °С в течение 60 с, а затем кратковременную промывку в проточной воде [23].

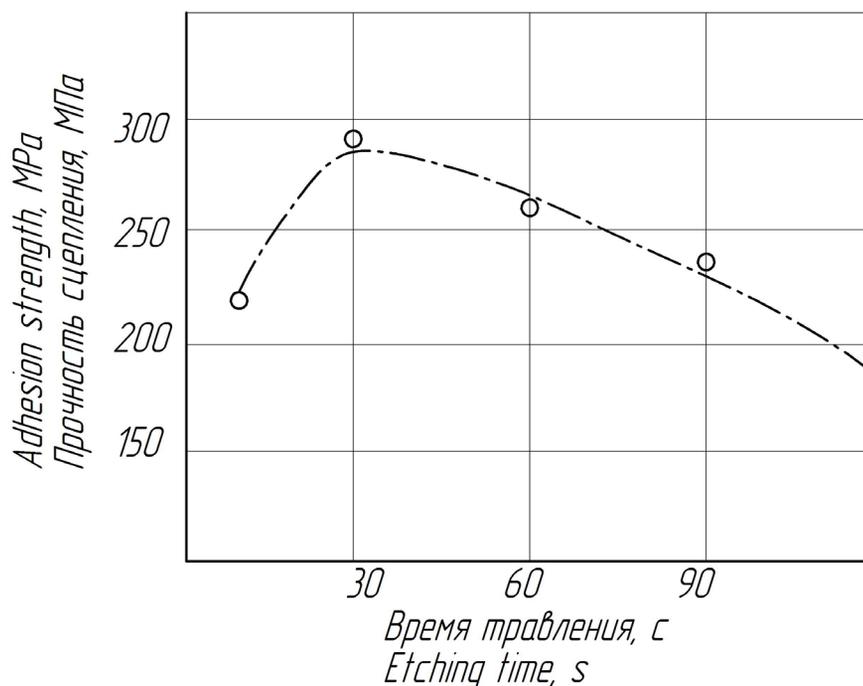


Рисунок 2 – Влияние продолжительности анодного травления на прочность сцепления при анодной плотности тока $D_a=120-130$ А/дм²
 Источник: составлено автором.

Figure 2 – The effect of anode etching duration on the adhesion strength at the anode current density of $D_a = 120-130$ A/dm²
 Source: compiled by the author.

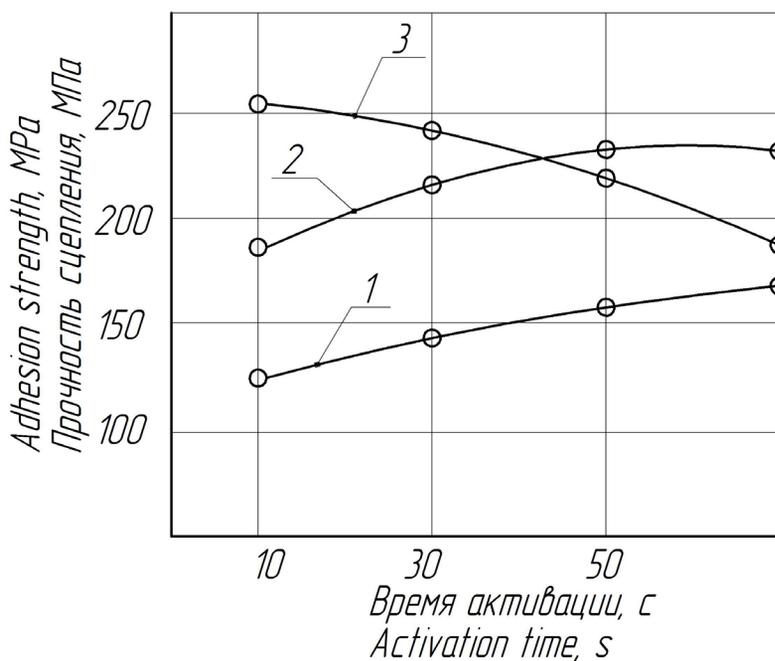


Рисунок 3 – Влияние продолжительности активирования в ванне хромирования на прочность сцепления при концентрации плавиковой кислоты 0,8 г/л и анодной плотности тока, А/дм²: 1 – 40; 2 – 80; 3 – 100
 Источник: составлено автором.

Figure 3 – The effect of the activation duration in the chrome plating bath on the adhesion strength at a hydrofluoric acid concentration of 0.8 g/l and the anode current density, A/dm²: 1 - 40; 2 - 80; 3 - 100
 Source: compiled by the author.

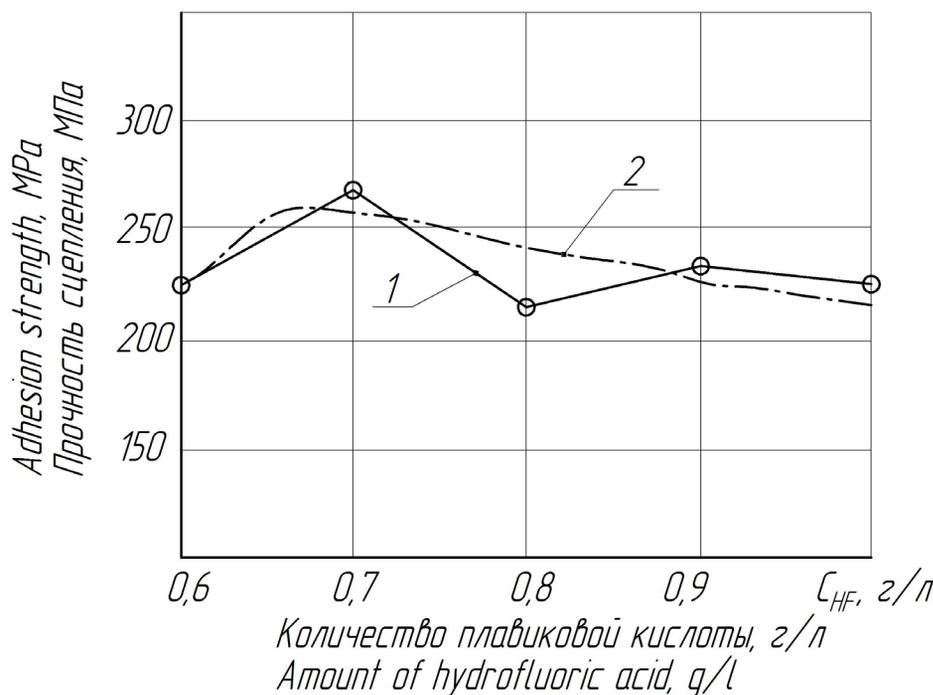


Рисунок 4 – Влияние концентрации плавиковой кислоты на прочность сцепления покрытий с основой: 1 – экспериментальная зависимость; 2 – теоретическая функция
Источник: составлено автором.

Figure 4 – Effect of hydrofluoric acid concentration on the adhesion strength of coatings to the substrate:
1 – experimental dependence; 2 – theoretical function
Source: compiled by the author.

При анодной плотности тока 40 A/дм^2 (рисунок 3) с увеличением продолжительности активирования прочность сцепления повышается от 126 до 168 МПа. Однако более эффективно активирование при анодной плотности 80 A/дм^2 и продолжительности операции более 50 с (рисунок 3, кривая 2).

Однако при анодной плотности тока 100 A/дм^2 и продолжительности 10 с (см. рисунок 3, кривая 3) имеет место наибольшая прочность сцепления. Однако увеличение продолжительности процесса способствует уменьшению прочности сцепления покрытий с материалом основы. Это снижает стабильность и надёжность получения высокой прочности сцепления, усложняет эксплуатацию ванны.

Исследования показали, что введение в разработанный электролит неорганической добавки плавиковой кислоты не ухудшает

прочности сцепления осаждаемого покрытия с основой по сравнению с покрытиями, полученными из электролита без добавки (рисунок 4). Прочность сцепления покрытий при изменении концентрации плавиковой кислоты от 0,6 до 0,9 г/л колебалась в интервале 270–218 МПа, а разрушение покрытий происходило с частичным разрушением металла основы со следами покрытия на образце (см. рисунок 4). Это позволило предположить, что силы сцепления хромового покрытия и основного материала соизмеримы с межмолекулярными силами покрытия и материала основы.

Выявленные закономерности изменения прочности сцепления условий анодной подготовки (см. рисунки 2, 3, 4) наиболее полно описываются математическим анализом полученных результатов.

Таблица 1
Уровни варьирования факторов
Источник: составлено автором.

Table 1
Levels of factors variation
Source: compiled by the author.

Независимые факторы		Значение параметра/кодированное		
		Нижний уровень	Средний уровень	Верхний уровень
Время электрохимического травления, с	X_1	20 (-1)	85 (0)	150 (1)
Плотность тока электрохимического травления, А/дм ²	X_2	20 (-1)	90 (0)	160 (1)
Количество плавиковой кислоты в растворе электролита, г/л	X_3	0,6 (-1)	0,8 (0)	1,0 (1)

Таблица 2
Матрица проведения экспериментов
Источник: составлено автором.

Table 2
Matrix of experiments
Source: compiled by the author.

№ опыта	Время электрохимического травления, с	Плотность тока электрохимического травления, А/дм ²	Количество плавиковой кислоты в растворе электролита, г/л	Прочность сцепления, МПа
1	-1	-1	-1	220
2	-1	-1	0	235
3	-1	-1	1	215
4	-1	0	-1	235
5	-1	0	0	250
6	-1	0	1	225
7	-1	1	-1	260
8	-1	1	0	280
9	-1	1	1	250
10	0	-1	-1	225
11	0	-1	0	240
12	0	-1	1	220
13	0	0	-1	240
14	0	0	0	260
15	0	0	1	235
16	0	1	-1	260
17	0	1	0	285
18	0	1	1	245
19	1	-1	-1	215
20	1	-1	0	240
21	1	-1	1	220
22	1	0	-1	230
23	1	0	0	235
24	1	0	1	210
25	1	1	-1	245
26	1	1	0	260
27	1	1	1	235

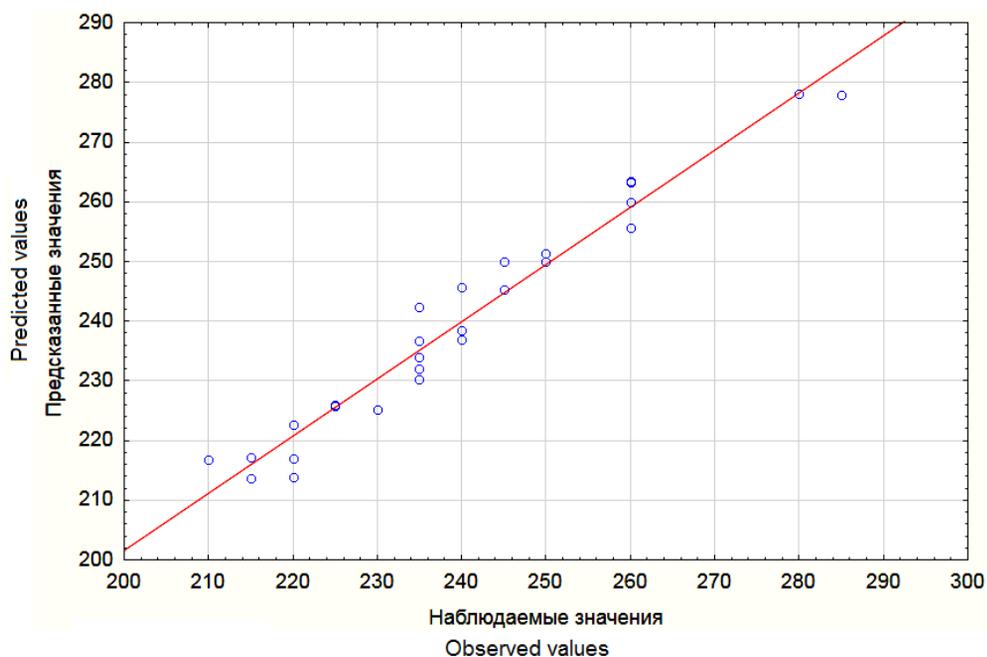


Рисунок 5 – График рассеивания наблюдаемых и предсказанных значений прочности сцепления, МПа
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Dispersion graph of observed and predicted values of adhesion strength, MPa.
Source: compiled by the author.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения математической зависимости и построения модели изменения прочности сцепления получаемого хромового покрытия с основой был проведён статистический анализ данных результатов с целью получения зависимости и влияния основных независимых факторов [24].

Было определено, что наиболее значимыми, независимыми факторами, влияющими на прочность сцепления, являются – время электрохимического травления, плотность тока электрохимического травления и количество плавиковой кислоты в растворе электролита. Остальные факторы были отброшены из-за малого влияния на прочность сцепления хромового покрытия с основой детали.

С целью дальнейшего варьирования полученными результатами были определены уровни максимального, минимального и среднего значения независимых факторов, которые указаны в таблице 1.

При проведении статистической обработки было определено, что наиболее точно можно

получить результаты при плане проведения многофакторного эксперимента 3-1-27, при котором 3 – количество независимых факторов, 1 – количество зависимых факторов, 27 – количество проводимых опытов. Значения независимых факторов брались как среднее значение из 3 повторяющихся опытов, при одинаковых условиях и режимах (таблица 2).

Для обработки полученных статистических данных использована программа Statistica, с помощью которой был проведен анализ результатов и получены необходимые графики и математическая модель прочности сцепления хромового покрытия с основой детали. При этом обработка данных показала, что полученные значения находятся с минимальными отклонениями и погрешностью, соответствуют табличным значениям Стьюдента и Фишера. Поэтому были сделаны выводы, что полученная математическая модель является адекватной и отражает точное предсказание полученных результатов⁴ [24, 25, 26].

Полученные результаты графика рассеивания показали, что все точки проведенных 27 опытов находятся в границах факторного пространства и соответствуют закону распре-

⁴ Горбунов И. П., Горбунов Д. И. Математическое моделирование процесса диффузионного хромирования стали. Теория и практика производства листового проката. Сборник научных трудов. Часть 2. Липецк: ЛГТУ, 2008. С. 68–72.

деления. Кроме того, все точки располагаются симметрично, что подтверждает соответствие его определённому закону, который близок к нормальному. Поэтому отсутствует влияние

случайных величин, что в свою очередь не требует проведения дополнительных опытов для достоверности полученных результатов (рисунок 5).

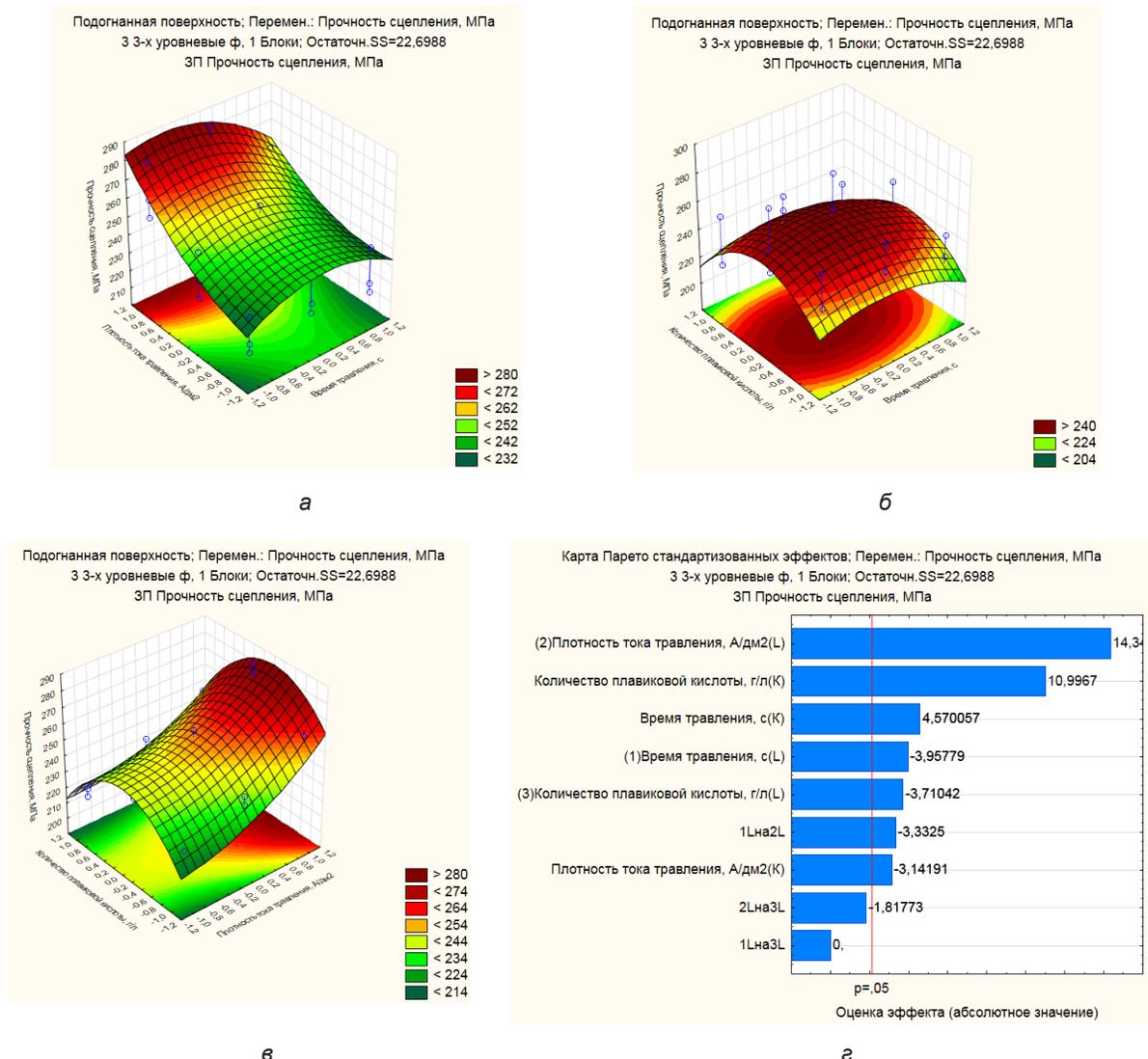


Рисунок 6 – Изображения полученных подогнанных поверхностей прочности сцепления хромового покрытия с основой детали, при различных значениях независимых факторов при проведении статистического анализа: а – изменение значения плотности тока травления и времени травления при среднем значении количества плавиковой кислоты; б – изменение значения количества плавиковой кислоты и времени травления при среднем значении плотности тока травления; в – изменение значения количества плавиковой кислоты и плотности тока травления при среднем значении времени травления; г – карта Парето при построении подгонных поверхностей модели второго порядка
 Источник: составлено автором.

Figure 6 – Images of the obtained fitted surfaces of the adhesion strength of the chrome coating to the base of the part, with different values of independent factors during statistical analysis: а – change in the value of the etching current density and etching time at an average value of the amount of hydrofluoric acid; б – change in the value of the amount of hydrofluoric acid and etching time at an average value of the etching current density; в – change in the value of the amount of hydrofluoric acid and the etching current density at the average etching time; д – Pareto map in the construction of fitting surfaces of the second-order model
 Source: compiled by the author.

С целью получения наглядного изображения подогнанной поверхности, где в качестве зависимого фактора выступает прочность сцепления, а в качестве изменяющегося значения два независимых фактора при среднем значении одного независимого фактора. При этом получились виды подогнанных поверхностей и карта Парето, показывающие влияние независимых факторов на прочность сцепления хрома с основой детали, которые показаны на рисунке 6.

При анализе статистической обработки полученных результатов опытов в виде графического изображения полученных поверхностей при влиянии независимых факторов было получено, что наибольшее сцепление хромового покрытия с основой детали можно получить при следующих значениях: плотность тока травления в пределах 130–140 А/дм², время травления 60–90 с и количества плавиковой кислоты 0,65–0,9 г/л в растворе электролита хромирования.

Для получения уравнения регрессии были проведены расчёты с помощью программы Statistica и получены коэффициенты, которые являются значимыми для получения уравнения регрессии прочности сцепления. Значимые коэффициенты выделены красным цве-

том и изображены в виде таблицы, взятые из программы Statistica (таблица 3).

В результате полученных данных дисперсионного анализа (см. таблицу 3), последние четыре столбца в таблице определены как значимые для уравнения регрессии. Первый столбец значения коэффициента включён в уравнение с использованием значений, выделенных красным цветом, как наиболее значимых, влияющих на конечный результат прочности сцепления. Далее приведём полученное линейное уравнение регрессии, которое будет определять зависимость времени электрохимического травления, плотности травления и количество плавиковой кислоты на прочность сцепления хромового покрытия с основой детали.

$$Y = 239,6295 - 4,44 \cdot X_1 + 4,44 \cdot X_1^2 + 16,11 \cdot X_2 - 3,06 \cdot X_2^2 - 4,17 \cdot X_3 + 10,69 \cdot X_3^2 - 4,58 \cdot X_1 \cdot X_2,$$

где Y – значение, предсказываемое прочностью сцепления хромового покрытия с основой детали, МПа;

X₁, X₂, X₃ – перекодированные независимые факторы времени электрохимического травления, времени травления и количества плавиковой кислоты соответственно.

Таблица 3
Анализ дисперсии при получении математической линейной модели
Источник: составлено автором.

Table 3
Analysis of variance in obtaining a mathematical linear model
Source: compiled by the author.

Фактор	Коэффициент	Статистическая ошибка коэффициента	-95, % - доверительно предельные	+95, % - доверительно предельные
Сред/Св.член	239,6296	0,916895	237,6952	241,5641
(1)Время травления, с(L)	-4,4444	1,122962	-6,8137	-2,0752
Время травления, с(K)	4,4444	0,972514	2,3926	6,4963
(2)Плотность тока травления, А/дм ² (L)	16,1111	1,122962	13,7419	18,4804
Плотность тока травления, А/дм ² (K)	-3,0556	0,972514	-5,1074	-1,0037
(3)Количество плавиковой кислоты, г/л(L)	-4,1667	1,122962	-6,5359	-1,7974
Количество плавиковой кислоты, г/л(K)	10,6944	0,972514	8,6426	12,7463
1L на 2L	-4,5833	1,375342	-7,4851	-1,6816
1L на 3L	0,0000	1,375342	-2,9017	2,9017
2L на 3L	-2,5000	1,375342	-5,4017	0,4017

Данное уравнение регрессии по прочности сцепления хромового покрытия с основой детали даст возможность предопределить наиболее оптимальные режимы и состав электролита хромирования для получения покрытий с наибольшей прочностью сцепления с целью возможности использования разработанного электролита при восстановлении деталей специализированного автотранспорта и дорожно-строительных машин, эксплуатирующих гидропривод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведённые исследования позволили установить рациональные условия предварительной подготовки закалённой стали 40X, из которой изготовлены детали, работающие при гидроабразивном изнашивании – золотники гидрораспределителей, плунжера насосов и др. При этом время электрохимического травления составляет 60–90 с, плотность травления 130–140 А/дм² и количество плавиковой кислоты в диапазоне 0,6–0,9 г/л, что обеспечивает высокую прочность сцепления с хромовыми покрытиями. Поэтому это даёт основание рекомендовать использование таких покрытий для восстановления ответственных деталей автотранспорта, работающих при гидроабразивном изнашивании.

Кроме того, была сделана математическая обработка влияния параметров режимов электрохимического травления и количества плавиковой кислоты в растворе электролита хромирования на прочность сцепления хромового покрытия с основой детали. Благодаря полученным результатам статистической обработки получено уравнение регрессии по прочности сцепления. Оно позволит предсказать оптимальные режимы и количество плавиковой кислоты для получения высокой прочности сцепления с целью использования разработанной технологии при восстановлении деталей машин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Котомчин А. Н., Корнейчук Н. И. Влияние условий эксплуатации дорожно-строительных машин и специализированного автотранспорта на ресурс их узлов и агрегатов // Технический сервис машин. 2019. № 2(135). С. 135–142.
2. 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>
3. Фомичев В. Т., Садовникова В. В., Москвичева Е. В. Легирование электролитического хрома молибденом в электролите, содержащем органи-

ческие добавки // Гальванотехника и обработка поверхности. 1992. Т. 1, № 3. С. 44–46.

4. Ткаченко И. Д. [и др.] Усовершенствование технологии хромирования с применением неорганических и органических композиций // Разработка и применение твердых металлических покрытий. Днепропетровск. 1981. С. 223–224.

5. Котомчин А. Н., Ляхов Ю. Г. Анализ электролитов хромирования для восстановления и упрочнения деталей машин // Вестник Приднестровского университета. Серия: Физико-математические и технические науки. Экономика и управление. 2017. № 3(57). С. 113–119.

6. 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.

7. Котомчин А. Н., Синельников А. Ф., Корнейчук Н. И. Интенсификация процесса электролитического хромирования при восстановлении и упрочнении деталей машин // Мир транспорта и технологических машин. 2020. № 3 (70). С. 22–32.

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

9. Едигарян А. А., Полукаров Ю. М. Электроосаждение хрома и его сплавов из сульфатных растворов Cr (III) // Гальванотехника и обработка поверхности. 2001. Т. 9, № 3. С. 17–18.

10. Максименко С. А., Балакина О. А. Электроосаждение хромовых покрытий из электролитов на основе хрома (3) и муравьиной кислоты // Гальванотехника и обработка поверхности. 1992. Т. 1, № 3-4. С. 47–50.

11. 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. Т. 130. С. 254–264.

12. Кудрявцев В. Н., Винокуров Е. Г., Кузнецов В. В. Толстослойное хромирование из электролитов на основе сернокислого хрома // Гальванотехника и обработка поверхности. 1998. Т. 6, № 1. С. 24–30.

13. Солодкова Л. Н., Ващенко С. В., Кудрявцев В. Н. Высокопроизводительный электролит износостойкого хромирования // Гальванотехника и обработка поверхности. 2003. Т. 11, № 3. С. 31–33.

14. Baraldi P., Soragni E. On the kinetics of chromium electrodeposition on copper electrodes // J. Alloys and Compounds. 2001. № 317-318. pp. 612-618.

15. Котомчин А. Н., Синельников А. Ф. Установка для поддержания рабочей температуры электролитов при восстановлении деталей машин гальваническими покрытиями. Вестник СибАДИ. 2020;17(4):500–511. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-500-511>

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

17. Chromabscheidung aus wässrigen Lösungen. Aufbau des Kathodenfilms Galvanotechnik. 2006. №12. Teil 11.. pp. 2888–2896.

18. Bolch T., Linde R. u.a. Innovative Oberflächenstrukturen durch elektrochemische Beschichtungsverfahren // Galvanotechnik. 2005. №103. pp. 2095–2100.

19. Chromabscheidung aus wässrigen Lösungen. Chromsaurelösungen Galvanotechnik. 2005. №9. Teil. 1. pp. 2063–2071.

20. Корнейчук Н. И., Ковбасюк А. В. [и др.] Влияние концентрации трехвалентных соединений хрома на некоторые параметры холодного хромирования // Труды Кишиневского СХИ. 1975. № 144. С. 17–23.

21. Аджиев Б. У., Ващенко С. В., Соловьева З. А. Влияние структуры и физико-механических свойств хрома на износостойкость хромовых покрытий // Гальванотехника и обработка поверхности. 1992. Т. 1, № 1. С. 28–31.

22. Солодкова Л. Н., Соловьева З. А. Исследование пленки на катоде при электровосстановлении хромовой кислоты // Электрохимия. 1994. Т. 30, № 10. С. 1254–1256.

23. 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.

24. Зорин В. А., Штефан Ю. В., Тимченко М. И. Планирование экспериментов при создании деталей из композиционных материалов // Механизация строительства. 2018. Т. 79, № 4. С. 5–13.

25. Галдина В. Д., Черногородова М. С. Подбор составов активированных минеральных порошков с использованием метода планирования эксперимента. Вестник СибАДИ. 2017;(2(54)):90-98. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2\(54\)-90-98](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-90-98)

26. Витязь П. А., Жилинский О. В., Лактюшина Т. В. Компьютерная методология выбора технически оптимального варианта в многокритериальных задачах проектирования материалов // Физическая мезомеханика. Томск. 2004. Т. 7. Спец. выпуск. Ч. 1. С. 3–11.

REFERENCES

1. Kotomchin A. N., Kornejchuk N.I. Vliyanie uslovij ekspluatatsii dorozhno-stroitel'nyh mashin i specializirovannogo avtotransporta na resurs ih uzlov i agregatov. [The influence of the operating conditions of road construction machines and specialized vehicles on the resource of their components and aggregates]. *Tekhnicheskij servis mashin*. 2019; 2(135): 135-142. (in Russ.)

2. Kotomchin A. N., Sinelnikov A. F., Kornejchuk 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>

3. Fomichev V. T., Sadovnikova V. V., Moskvicheva E. V. Legirovanie jelektroliticheskogo hroma molibdenom v jelektrolite, sodержashhem organicheskie dobavki [Alloying of electrolytic chromium with molybdenum in an electrolyte containing organic additives]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 1992; vol. 1. no. 3: 44-46. (In Russ.)

4. Tkachenko I. D. i dr. Usovshenstvovanie tehnologii hromirovaniya s primeneniem neorganicheskikh i organicheskikh kompozitsij [Improvement of chrome plating technology with the use of inorganic and organic compositions]. *Razrabotka i primenenie tverdyh metallicheskih pokrytij*. Dnepropetrovsk: 1981: 223-224. (in Russ.)

5. Kotomchin A. N., Lyahov YU. G. Analiz jelektrolitov hromirovaniya dlya vosstanovleniya i uprochneniya detalej mashin. [Analysis of chrome plating electrolytes for the restoration and hardening of machine parts] *Vestnik Pridnestrovskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskije nauki. Ekonomika i upravlenie*. 2017; 3(57): 113-119. (in Russ.)

6. Kotomchin A. N., Sinelnikov A. F., Kornejchuk N. I. Ispol'zovanie iznosostojkogo hromirovaniya pri vosstanovlenii i uprochnenii detalej avtomobilej [The use of wear-resistant chrome plating in the restoration and strengthening of car parts]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2021;1 (64): 11-17. (in Russ.)

7. Kotomchin A. N., Sinelnikov A. F., Kornejchuk N. I. Intensifikacija processa jelektroliticheskogo hromirovaniya pri vosstanovlenii i uprochnenii detalej mashin [Intensification of the process of electrolytic chrome plating during restoration and hardening of machine parts]. *Mir transporta i tehnologicheskij mashin*. 2020; 3 (70): 22-32. (in Russ.)

8. Elinek T. V. Uspehi gal'vanotekhniki. Obzor mirovoj special'noj literatury za 2017–2018 gody [Advances in electroplating. World literature review for 2017-2018]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 2019; vol. 27. no. 3: 4-14. (in Russ.)

9. Edigarjan A. A., Polukarov Ju. M. *Jelektroosazhdenie hroma i ego splavov iz sul'fatnyh rastvorov Sg (III)* [Electrodeposition of chromium and its alloys from SG (III) sulphate solutions]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 2001; vol.9. no. 3: 17-18. (in Russ.)

10. Maksimenko S. A., Balakina O. A. Jelektroosazhdenie hromovyh pokrytij iz jelektrolitov na osnove hroma (3) i murav'inoj kisloty [Electrodeposition of chromium coatings from electrolytes based on chromium (3) and formic acid]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 1992; vol.1. no. 3-4: 47-50. (in Russ.)

11. Kornejchuk N. I., Lyalyakin V. P. Perspektivy ispol'zovaniya industrial'nyh metodov vosstanovleniya iznoshennyh detalej mashin gal'vanicheskimi i polimernymi pokrytijami v sovremennyh usloviyah razvitiya agropromyshlennogo tekhnicheskogo 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; vol.130: 254-264. (in Russ.)

12. Kudrjavcev V. N., Vinokurov E. G., Kuznetsov V. V. Tolstoslojnoe hromirovanie iz jelektrolitov na osnove sernokislogo hroma [Thick-layer chromium plating of chromium sulphate electrolytes]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 1998; vol. 6. no.1: 24-30. (in Russ.)

13. Solodkova L. N., Vashhenko S. V., Kudrjavcev V. N. Vysokoproizvoditel'nyj jelektrolit iznosostojkogo hromirovanija [High-performance wear-resistant chrome-plated electrolyte]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 2003; vol. 11. no. 3: 1-33. (in Russ.)

14. Baraldi P., Soragni E. On the kinetics of chromium electrodeposition on copper electrodes. *J. Alloys and Compounds*. 2001; 317-318: 612-618.

15. Kotomchin A.N., Sinelnikov A.F. Installation for maintaining the operating temperature of electrolytes when restoring machine parts with electroplated coatings. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020;17(4):500-511. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-500-511>

16. Kornejchuk N. I. Perspektivy intensivatsii vosstanovleniya detalej mashin jelektroliticheskim. [Prospects of intensification of restoration of machine parts by electrolytic chrome plating]. *Trudy GOSNITI*. 2010; vol.106: 197-203. (in Russ.)

17. *Chromabscheidung aus wassrigen Losungen*. Aufbau des Kathodenfilms Galvanotechnik. 2006. no.12. Teil 11. pp. 2888-2896.

18. Bolch T., Linde R. u.a. Innovative Oberflächenstrukturen durch elektrochemische Beschichtungsverfahren. *Galvanotechnik*. 2005; 103: 2095-2100.

19. Chromabscheidung aus wassrigen Losungen. *Chromsaurelosungen Galvanotechnik*. 2005. no. 9. Teil. 1. pp. 2063-2071.

20. Kornejchuk N. I., Kovbasjuk A.V. i dr. Vlijanie koncentracii trehvalentnyh soedinenij hroma na nekotorye parametry holodnogo hromirovanija [Influence of concentration of trivalent chromium compounds on some parameters of cold chrome plating]. *Trudy Kishinevskogo SHI*. 1975; 144: 17-23. (in Russ)

21. Adzhiev B. U., Vashhenko S. V., Solov'eva Z. A. Vlijanie struktury i fiziko-mehanicheskikh svoystv hroma

na iznosostojkost' hromovyh pokrytij [Influence of the structure and physical and mechanical properties of chromium on the wear resistance of chrome coatings]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 1992; 1. no. 1: 28-31. (in Russ)

22. Solodkova L. N., Solov'eva Z. A. Issledovanie plenki na katode pri jelektrovoosstanovlenii hromovoj kisloty [Investigation of the film on the cathode during the electric recovery of chromic acid]. *Jelektrohimiya*. 1994; vol. 30. no. 10: 1254-1256. (in Russ)

23. Shluger M. A., Tok L. D. Novye jelektrolity dlja pokrytij hromom i ego splavami [New electrolytes for chromium and its alloys coatings]. *Zhurnal Vsesojuznogo himicheskogo obshhestva im. D. I. Mendeleeva*. 1988; vol. 32. no. 3: 297-305. (in Russ)

24. Zorin V. A., Shtefan Ju. V., Timchenko M. I. Planirovanie jeksperimentov pri sozdanih detalej iz kompozicionnyh materialov [Planning experiments when creating parts from composite materials]. *Mehanizacija stroitel'stva*. 2018; vol. 79. no. 4: 5-13. (in Russ)

25. Galdina V. D., Chernogorodova M. S. Selection of structures of the activated mineral powders with use of a method of planning of experiment. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017;(2(54)):90-98. (In Russ.) [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2\(54\)-90-98](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-90-98)

26. Vitjaz' P. A., Zhilinskij O. V., Laktjushina T. V. Komp'juternaja metodologija vybora tehnikeski optimal'nogo varianta v mnogokriterial'nyh zadachah proektirovanija materialov [Computer methodology for selecting the technically optimal option in multi-criteria problems of material design]. *Fizicheskaja mezomehanika*. Tomsk. 2004; vol. 7. Spec. vypusk. Ch. 1: 3-11.27. (in Russ)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Котомчин Алексей Николаевич – аспирант кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин»; старший научный сотрудник лаборатории «Реновация машин и оборудования».

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Aleksei N. Kotomchin – Postgraduate student of the Cars and Road Vehicles Production and Repair Department; Senior Researcher of the Machinery and Equipment Renovation Laboratory.