

Научная статья  
 УДК 669.058.7  
 DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-260-276>  
 EDN: CBHVWL



# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ СПЛАВА ЖЕЛЕЗО-ХРОМ ИЗ СУЛЬФАТНО-ХЛОРИДНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

А. С. Янута<sup>\*1</sup>, Ю. В. Штефан<sup>1</sup>, В. К. Фёдоров<sup>1</sup>, Н. И. Корнейчук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Бендерский политехнический филиал Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко, г. Бендеры, Молдова (Приднестровье)

ianyta\_anton@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7134-6979>

shtephan@madi.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7882-4873>

kaskadf@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5840-4759>

n.corneiciuc@uasm.md, <http://orcid.org/0000-0002-6420-389X>

<sup>\*</sup>ответственный автор

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Технологический процесс восстановления детали должен обеспечивать более 80% ресурса и не более 50% стоимости новой детали. Износостойкость нанесенного покрытия предопределяет ресурс восстановленной детали, работающей при гидроабразивном и граничном трении. Микротвердость электролитического покрытия на основе железа является одним из ключевых показателей износостойкости. Исследование результатов статистической обработки и факторов, наибольшим образом влияющих на повышение микротвердости покрытия на основе железа, позволит рекомендовать и оптимизировать условия осаждения для получения наиболее износостойких покрытий.

**Материалы и методы.** Исследования проводили на оборудовании, позволяющем получать необходимые данные с требуемой точностью. Математическую обработку проводили с применением современных средств обработки статистических данных, которые исключали возможные ошибки, позволяя получать зависимость факторов с необходимой точностью.

**Результаты.** В ходе исследования разработанного сульфатно-хлоридного электролита для осаждения железохромового покрытия возникла необходимость определения влияния условий осаждения – «факторов» (температура, кислотность электролита, плотность катодного тока) на микротвердость покрытия – «отклик». Было выявлено, что сочетание факторов «температура» и «катодная плотность тока» в кодированных значениях 1,5...2,0 и -2 являются наиболее значимыми. Оптимизированы условия осаждения с целью получения покрытия с максимальной микротвердостью.

**Обсуждение и заключение.** В результате проведенных исследований влияния условий осаждения сплава Fe-Cr из сульфатно-хлоридного электролита на микротвердость покрытия установлено, что для получения качественного покрытия сплава железо-хром с высокими показателями микротвердости необходимо точно соблюдать требования условий осаждения и кислотности в большей степени. Так как плотность тока и температура электролита, по сравнению с кислотностью электролита, устанавливаются и регулируются оборудованием ванны железнения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** железнение, сплав, железо-хром, восстановление, износостойкость, микротвердость, уравнение регрессии, статистическая обработка, температура электролита, кислотность электролита, плотность тока

**БЛАГОДАРНОСТИ:** благодарность рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 19.01.2023; одобрена после рецензирования 06.03.2023; принята к публикации 21.04.2023.

© Янута А. С., Штефан Ю. В., Фёдоров В. К., Корнейчук Н. И., 2023



Контент доступен под лицензией  
 Creative Commons Attribution 4.0 License.

**Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

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

Для цитирования: Янута А. С., Штефан Ю. В., Фёдоров В. К., Корнейчук Н. И. Моделирование процесса электролитического покрытия сплава железо-хром из сульфатно-хлоридного электролита при восстановлении деталей машин // Вестник СиБАДИ. 2023. Т. 20, № 2 (90). С. 260-276. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-260-276>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-260-276>

EDN: CBHVWL

## ELECTROLYTIC COATING OF IRON-CHROMIUM ALLOY OF SULPHATE-CHLORIDE ELECTROLYTE IN MACHINE PARTS RECOVERY PROCESS MODELLING

Anton S. Lanuta<sup>\*1</sup>, Yuri V. Shtefan<sup>1</sup>, Valerii K. Fiodorov<sup>1</sup>, Nikolai I. Korneichuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI),  
Moscow, Russia

<sup>2</sup>Bendery Polytechnic Branch of T.G. Shevchenko Pridnestrovian State University,  
Bendery, Moldova (Pridnestrovie)

[ianyta\\_anton@mail.ru](mailto:ianyta_anton@mail.ru), <http://orcid.org/0000-0002-7134-6979>

[shtefan@madi.ru](mailto:shtefan@madi.ru), <http://orcid.org/0000-0002-7882-4873>

[kaskadf@yandex.ru](mailto:kaskadf@yandex.ru), <http://orcid.org/0000-0002-5840-4759>

[n.corneiciuc@uasm.md](mailto:n.corneiciuc@uasm.md), <http://orcid.org/0000-0002-6420-389X>

<sup>\*</sup>corresponding author

### ABSTRACT

**Introduction.** The technological process of restoring a part should provide more than 80% of the resource and no more than 50% of the cost of a new part. The wear resistance of the applied coating determines the resource of the restored part operating under waterjet and boundary friction. The microhardness of an iron-based electrolytic coating is one of the key indicators of wear resistance. The study of the results of statistical processing and the factors most affecting the increase in the microhardness of the iron-based coating will make it possible to recommend and optimize the deposition conditions for obtaining the most wear-resistant coatings.

**Materials and methods.** The studies on equipment that let to obtain the necessary data with the required accuracy were carried out. The mathematical processing using modern statistical data processing tools that excluded possible errors, let to obtain the dependence of factors with the necessary accuracy was carried out.

**Results.** During the study of the developed sulfate-chloride electrolyte for the deposition of an iron-chromium coating, it became necessary to determine the effect of deposition conditions – ‘factors’ (temperature, acidity of the electrolyte, cathode current density) on the microhardness of the coating – ‘response’. It was found that the combination of the factors ‘temperature’ and ‘cathode current density’ in the coded values of 1.5...2.0 and -2 are the most significant. The deposition conditions in order to obtain a coating with maximum microhardness are optimized.

**Discussion and conclusions.** As a result of the conducted studies for the effect of the deposition conditions of the Fe-Cr alloy from the sulfate-chloride electrolyte on the microhardness of the coating, it was found that in order to obtain high-quality coatings of the iron-chromium alloy with high microhardness, it is necessary to strictly comply with the requirements of the deposition conditions and acidity to a greater extent. As the current density and temperature of the electrolyte, compared with the acidity of the electrolyte, iron baths are installed and regulated by equipment.

**KEYWORDS:** ferruginization, alloy, iron-chromium, recovery, wear resistance, microhardness, regression equation, statistical processing, electrolyte temperature, electrolyte acidity, current density

**ACKNOWLEDGEMENTS:** The author expresses gratitude to the reviewers of the article.

© Lanuta A. S., Shtefan Y. V., Fiodorov V. K., Korneichuk N. I., 2023



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

*The article was submitted 19.01.2023; approved after reviewing 06.03.2023; accepted for publication 21.04.23.*

*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:* Anton S. Lanuta, Yuri V. Shtefan, Valerii K. Fiodorov, Nikolai I. Korneichuk Electrolytic coating of iron-chromium alloy of sulphate-chloride electrolyte in machine parts recovery process modelling. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (2): 260-276. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-260-276>

## ВВЕДЕНИЕ

Современная автомобильная, дорожно-строительная и специальная техника совершенствуется, усложняются конструкции, что приводит к повышению финансовых и трудовых затрат на ее ремонт [1]. Восстановление деталей позволяет снизить затраты на покупку детали до 50%. Известно, что более 40% деталей при ремонте техники пригодны для последующего восстановления [2].

Электролитический процесс восстановления имеет низкую себестоимость и достаточно высокую производительность. Так, износостойкие хромовые покрытия имеют высокую микротвердость более 1000 кг/мм<sup>2</sup>, что позволяет их использовать при восстановлении деталей, работающих при гидроабразивном изнашивании [3, 4]. Недостатком применения гальванического хромирования является низкий выход хрома по току процесса осаждения и необходимость поддержания в узком диапазоне температуры электролита. В ходе осаждения большое количество энергии затрачивается на сопутствующие электролитические процессы. Для стабилизации температурного режима, особенно в холодных электролитах, возникает необходимость использовать энергоемкие холодильные установки, поддерживающие оптимальный рабочий диапазон температур [5]. Электролитическое железнение лишено данных недостатков, являясь производительным процессом, позволяющим осаждать покрытие со скоростью до 0,5 мм/ч и толщиной до 1,5 мм. Однако электролитическое железнение не позволяет получать покрытия с микротвердо-

стью более 600–700 кг/мм<sup>2</sup> без дополнительных методов интенсификации процесса.

Одним из направлений совершенствования электролитического железнения является применение сплавов на основе железа, позволяющих повысить микротвердость, износ- и коррозионную стойкость покрытия [6, 7, 8]. При проведении анализа применяемых электролитов для получения электролитического железохромового покрытия были выявлены особенности осаждения износостойких покрытий сплава Fe-Cr из сульфатно-хлоридных электролитов [9]. Исследования влияния различных условий осаждения на кинетику процесса и физико-механические свойства осаждаемого покрытия позволили выявить, что получаемые покрытия сплава Fe-Cr имеют более высокую микротвердость по сравнению с электролитическим железом<sup>1,2</sup>[6]

На сегодняшний день электроосаждение двойных сплавов на основе железа недостаточно изученный процесс. Согласно данных различных исследований, микротвердость является одним из определяющих параметров износостойкости [10, 11, 12], поэтому весьма важным являются исследования по оптимизации сплава Fe-Cr из разработанного электролита, обеспечивающих максимальную износостойкость. Известны работы [13] по моделированию процесса хромирования, в исследованиях<sup>3</sup>[14, 15] приводятся результаты по оптимизации и разработке математической модели<sup>4</sup> электролитического железнения и моделирования композиционных гальванических покрытий [10].

<sup>1</sup> Янута А. С. Применение гальванического покрытия сплава на основе железа для восстановления изношенных деталей дорожно-строительной техники // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые, мелиоративные машины и робототехнические комплексы: Сборник статей XXVI-й Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. Москва. 2022. С. 585–589.

<sup>2</sup> Sinelnikov A.F., Bomeshko E.V., Korneychuk N.I., lanuta A.S. Electrolytic alloying of iron-chromium during deposition of coatings from a sulfate-chloride electrolyte // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (14th-16th December 2020, Moscow). Moscow. 2020. pp. 1-9.

<sup>3</sup> Серебровский В. В., Сафронов Р. И., Гнездилова Ю. П. Региональные проблемы повышения эффективности агро-промышленного комплекса: материалы Всероссийской научно-практической конференции // Прогнозирование износостойкости электроосажденных покрытий для восстановления деталей. Курск. 2007. Т. Часть 3. С. 274–277.

<sup>4</sup> Калмуцкий В. С. Оптимизация технологии осаждения износостойких покрытий. Кишинев: Штиинца, 1973. 108 с.

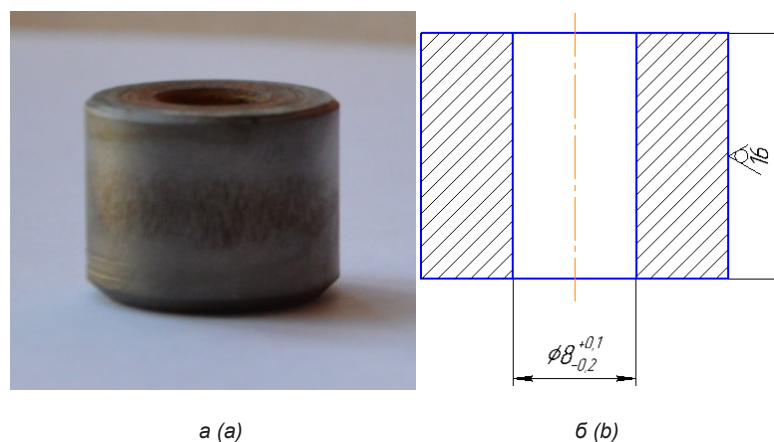


Рисунок 1 – Цилиндрические образцы для осаждения сплава железо-хром:  
а – фото образца; б – чертеж с габаритными размерами образца  
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Cylindrical samples for deposition of iron-chromium alloy:  
а – photo of the sample, б – drawing with overall dimensions of the sample  
Source: compiled by the authors.

Проведя анализ применяемых электролитов железнения, было выявлено, что в промышленности для восстановления деталей автомобильного транспорта наибольшее распространение получили хлоридные электролиты [9, 16, 17, 18, 19], которые имеют высокую производительность процесса, окисляемость, сложные эксплуатационные особенности. Было принято решение о разработке способа восстановления цилиндрических деталей автомобильного транспорта электролитическим методом на основе сульфатно-хлоридного электролита. В ходе исследований [20] кинетики процесса осаждения бинарного покрытия Fe-Cr, а также физико-механических свойств покрытия, применительно к восстановлению деталей автотранспорта были выделены особенности процесса, производительные режимы осаждения, закономерности влияния условий осаждения на морфологию и структуру покрытия<sup>1,2</sup>. Выявлены критические условия, при которых покрытия не удовлетворяют таким требованиям, как сцепляемость, однородность покрытия. Результаты данных исследований носят точечный характер с описанием закономерностей влияния условий осаждения на морфологию, структуру, микротвердость, скорость осаждения покрытия. В силу сложно-

сти процесса влияния, в том числе взаимного, условий осаждения на физико-механические характеристики покрытия практически отсутствуют научные исследования по математическому моделированию с целью оптимизации условий получения качественного электролитического сплава на основе железа.

На основании вышеизложенного целью настоящих исследований является разработка математической модели влияния условий осаждения (температура электролита, кислотность электролита, катодная плотность тока) на микротвердость сплава Fe-Cr из сульфатно-хлоридного электролита.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследований использовались образцы, на которые наносилось покрытие сплава Fe-Cr из сульфатно-хлоридного электролита<sup>5</sup>.

Для исследования процесса осаждения железохромового покрытия приготавливали сульфатно-хлоридный электролит, смешивая растворы сульфата хрома и хлорида железа в различных пропорциях. Раствор хлорида железа ( $\text{FeCl}_2$ ) приготавливали по известной методике [17], раствор сульфата хрома ( $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ ) – растворением твердого кристал-

<sup>5</sup> Янута А. С., Корнейчук Н. И., Бомешко Е. В. Электролит для получения железохромового покрытия: пат. № 543 Приднестровская Молдавская Республика, № 22100598, заявл. 20.04.2022; опубл. 01.06.2022. 4 с.



логидрата сульфата хрома в подкисленной воде с последующим доведением кислотности электролита до заданного значения pH с помощью 1 н. раствора HCl. Для приготовления электролитов использовали реактивы квалификации «Ч» и «ХЧ».

Покрывают наносили при постоянном токе на цилиндрические образцы из стали 20 (рисунок 1) с площадью покрываемой поверхности 0,1 дм<sup>2</sup>. Перед электролизом образцы обезжиривали венской известью, а затем анодно травили в 30%-ном водном растворе серной кислоты с последующей промывкой в проточной воде в течение 20 с. Цилиндрические образцы являются аналогом деталей типа вал, применяемые в автомобильной отрасли.

Для питания электролизёра использовали источник постоянного тока, выпрямитель ВУ-42/70А с двухполупериодной схемой выпрямления тока. При исследованиях плотность тока изменяли с помощью регулятора напряжения модели РНТ. Сила тока в цепи измерялась

амперметром М-104 кл. 0.5. Плотность тока изменяли в интервале 15...45 А/дм<sup>2</sup>, а кислотность – от 0,4 до 0,8 ед. pH. Панель управления рабочей установки питания электролизера представлена на рисунке 2. Рабочий объем в электролизёре составлял 2 л. Кислотность (pH) электролита контролировали с помощью pH-метра Smart Sensor модель AS218 с точностью измерения 0,01 ед. откалиброванными стандартными буферными растворами.

Подогрев и термостатирование электролита осуществлялись в термостате с точностью 0,1 °С при помощи термореле от 30 до 50 °С (рисунок 3).

Для обеспечения прочного сцепления гальванического осадка с поверхностью образца величину катодной плотности тока в начале процесса электроосаждения плавно увеличивали от А/дм<sup>2</sup> до заданного значения в течение 10 мин. Время осаждения покрытия составляло 1 ч с учетом «разгона».

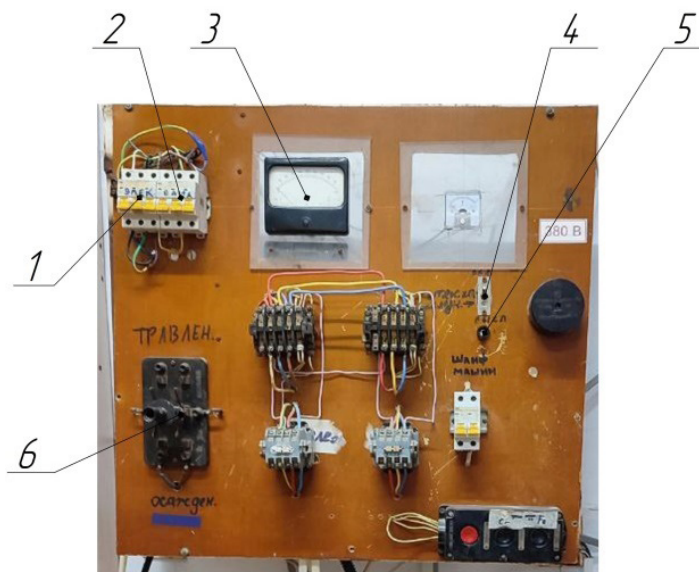


Рисунок 2 – Панель управления питания электролизера:

- 1 – автомат питания выпрямителя;
- 2 – автомат питания подогрева электролизера;
- 3 – вольтметр; 4 – тумблер включения освещения и питания управляющих реле;
- 5 – тумблер включения вытяжки;
- 6 – ключ включения процесса осаждения/травления

Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Control panel for the power supply of the electrolyzer:

- 1 – automatic rectifier power supply,
- 2 – automatic electrolyzer heating power supply,
- 3 – voltmeter, 4 – toggle switch for switching on lighting and powering control relays,
- 5 – toggle switch for turning on the hood,
- 6 – the key for turning on the deposition/etching process

Source: compiled by the authors.

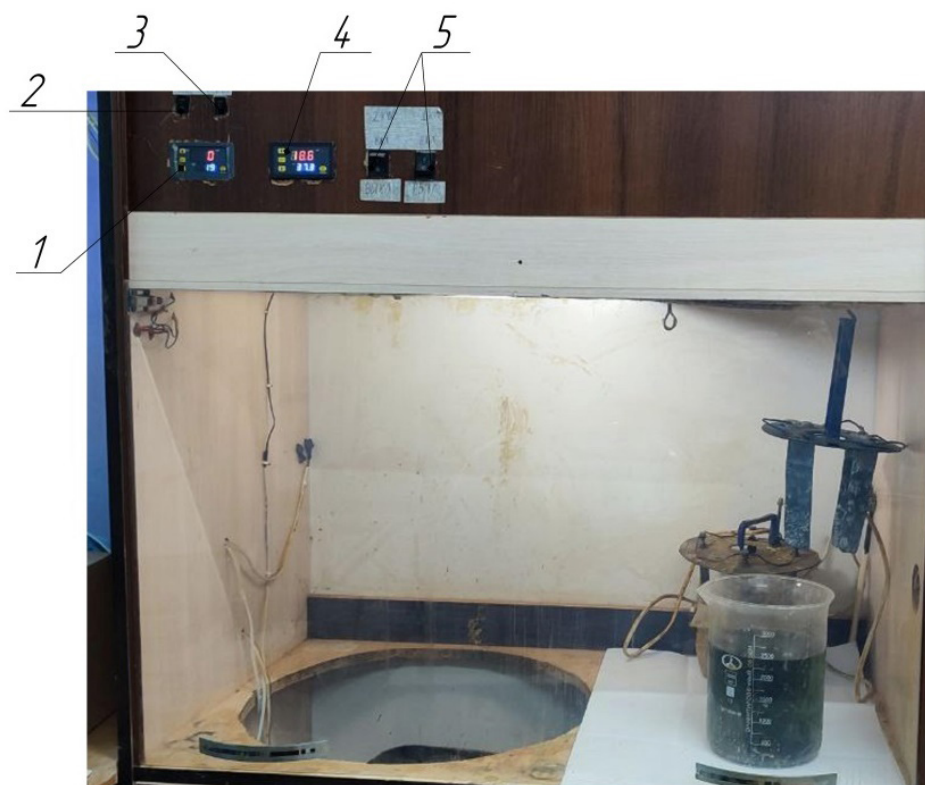


Рисунок 3 – Рабочее место железнения с термореле:  
 1 – реле времени для управления водяным насосом водяной бани;  
 2 – тумблер включения водяного насоса в обход реле времени;  
 3 – тумблер включения водяного насоса вместе с ТЭНом ванны;  
 4 – термореле; 5 – тумблера управления ТЭНом  
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – The workplace of the iron with a thermal relay:  
 1 – A time relay for controlling the water pump of the water bath,  
 2 – a toggle switch for turning on the water pump bypassing the time relay,  
 3 – a toggle switch for turning on the water pump together with the heating element of the bath,  
 4 – a thermal relay, 5 – a toggle switch for controlling the heating element  
 Source: compiled by the authors.

Измерение микротвердости покрытия производилось на микротвердомере ПМТ-3 с нагрузкой на инденторе 100 г (1Н) с последующим измерением размера диагонали отпечатка и расчета микротвердости по известной методике<sup>6,7,8</sup>

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выявления оптимальных технологических режимов проводили планирование экс-

периментов с целью построения математической модели зависимости твердости покрытий  $y_1 \dots y_3$  от уровня pH среды ( $x_1$ ), температуры ( $x_2$ ) и плотности тока ( $x_3$ ) в процессе гальванического осаждения покрытия Fe-Cr. Решение о выборе модели принимали экспертным путем для минимизации количества данных опытов. Учитывая изложенное, исследования проводили с применением планирования эксперимента на модели ортогональной центральной

<sup>6</sup> Ковенский И. М., Поветкин В. В. Методы исследования электролитических покрытий. М.: Наука, 1994. 95 с.

<sup>7</sup> ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78) Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. Введ. 01.01.77. М.: Издательство стандартов.

<sup>8</sup> Харитонов Л. Г. Определение микротвердости. Методика испытаний, измерение отпечатков, номограммы и таблицы для определения микротвердости. М.: Металлургия, 1967. 47 с.

композиционной модели (ОЦКП) (таблица 1), откуда видно, что варьировали 3 фактора на трех уровнях каждый, после чего проводили эксперимент и его статистическую обработку. Всего было проведено 16 опытов в различных точках факторного пространства, указанных выбранной моделью.

Интервал варьирования факторов эксперимента устанавливали исходя из поляризационных исследований, установивших примерные оптимальные пороги условий осаждения [18]. Проведенные предварительные исследования показали, что повышение плотности тока до 55 А/дм<sup>2</sup> при определенных режимах осаждения (температура и кислотность электролита) приводит к увеличению микротвердости покрытия.

Представленная в таблице 1 матрица планирования эксперимента для независимых друг от друга факторов была реализована после получения предварительных опытов, по определению влияния условий осаждения на микротвердость и структуру покрытия

[20]. Полученные при этом полиномы II степени дали возможность нам предположить, что адекватность полученной при планировании эксперимента модели будет достаточной, что и было проверено после статистической обработки результатов эксперимента по методике, изложенной в работах [22, 23]. Сравнивали дисперсии полученных откликов и по критерию Фишера, проверяли их принадлежность к генеральной совокупности. Максимальная дисперсия наблюдалась для  $\sigma_{y1} = 0,95 \text{ кг/см}^2$ , а для  $y_3$  – минимальная  $0,66 \text{ кг/см}^2$ . Тогда отношение большей к меньшей дисперсии дает расчетное значение критерия Фишера  $F_p = 0,95/0,66 = 1,46$ , что меньше табличного значения критерия для уровня доверительной вероятности 95%  $F_T(0,05) = 3,41$ . В то время как р-уровень значимости, определяемый при помощи встроенной функции ФТЕСТ в Microsoft Excel, равен 0,48, что более уровня значимости 0,05, следовательно, делается вывод о равенстве дисперсий.

Таблица 1  
Варьируемые факторы при планировании эксперимента  
Источник: составлено авторами.

Table 1  
Variable factors when experiment planning  
Source: compiled by the authors.

№ опыта	Кодированные значения факторов			Натуральные значения факторов			Отклик - твердость, кг/мм <sup>2</sup> *10 <sup>2</sup>			
				Уровень рН, x100	Температура, °С	Плотность тока, А/дм <sup>2</sup>				
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>ср</sub>
1	-1,0	-1,0	-1,0	50,00	30,00	15,00	7,12	6,98	7,5	7,20
2	-1,0	-1,0	1,0	50,00	30,00	45,00	6,45	6,9	6,9	6,75
3	-1,0	1,0	-1,0	50,00	50,00	15,00	7,4	7,2	7	7,20
4	-1,0	1,0	1,0	50,00	50,00	45,00	8,8	9,5	9,3	9,20
5	1,0	-1,0	-1,0	70,00	30,00	15,00	7,15	6,95	7,8	7,30
6	1,0	-1,0	1,0	70,00	30,00	45,00	7,7	7,2	7,6	7,50
7	1,0	1,0	-1,0	70,00	50,00	15,00	6,55	7,1	6,9	6,85
8	1,0	1,0	1,0	70,00	50,00	45,00	7,3	7,15	6,55	7,00
9	-1,7	0,0	0,0	26,34	40,00	30,00	7,9	7,5	7,7	7,70
10	1,7	0,0	0,0	93,63	40,00	30,00	8,3	7,5	7,9	7,90
11	0,0	-1,7	0,0	60,00	23,18	30,00	6,05	6,85	6,6	6,50
12	0,0	1,7	0,0	60,00	56,82	30,00	7,1	7	6,45	6,85
13	0,0	0,0	-1,7	60,00	40,00	4,77	5,4	6,1	6	5,80
14	0,0	0,0	1,7	60,00	40,00	55,23	7,3	7,7	7,5	7,50
15	0,0	0,0	0,0	60,00	40,00	30,00	7,4	8,2	7,8	7,80
16	0,0	0,0	0,0	60,00	40,00	30,00	7,6	7,4	7,2	7,40

Таблица 2  
Результаты преобразования Бокса-Кокса в Statistica  
для расчета критериев согласия, полученные в ПМ Statistica  
Источник: составлено авторами.

Table 2  
The results of the Box-Cox transformation into Statistica  
for calculating the consent criteria obtained in PM Statistica  
Source: compiled by the authors.

Преобразование Б-К зависимой переменной: Отклик - твердость, кг/мм2					
3 факторы, 1 Блоки; Остаточн. SS=.2993694					
ЗП Отклик - твердость, кг/мм2					
	Лямбда	SSE(I)	Хи^2(1)	p	
Статистики	0.368365	1.770570	0.230095	0.631457	

Встроенные функции указанного программного обеспечения позволили наряду с программой Statistica 10.0 проверить не только значимость каждого полученного коэффициента уравнения регрессии по критерию Стьюдента, но и адекватность полученной модели через расчет дисперсии адекватности, как и в работе с табличным<sup>9</sup>, сравнивая полученное расчетное значение с табличным по критерию Фишера:

$$F_p \leq F_T, \quad (1)$$

где  $F_p$  – расчетное значение критерия Фишера;  $F_T(pp=0,05; f_1=3; f_2=12)=3,49$ ;  $f_1$  – число степеней свободы числителя для трехфакторной модели  $k_1 = 3$ ,  $f_2$  – знаменателя, которое зависит от числа наблюдений  $n = 16$ , количества факторов  $m = 3$ .

Но при этом уже по условию 1 проверяли гипотезу об адекватности полученной модели:

$$F_p = \frac{S_{\text{адек}}^2}{S_y^2} = \frac{1,1}{3,34} = 0,317 \leq F_T(0,05; 24; 16) = 2,235.$$

Одно из несомненных достоинств программного модуля Statistica 10.0 (далее ПМ Статистика) состоит в быстрой возможности проверить способность статистически, предсказывать поведение модели в различных точках факторного пространства с помощью множественной регрессии еще до построения уравнений регрессии и поверхностей отклика. Результаты проверки полученной модели представлены в таблице 2.

Близость спрогнозированных моделью зависимостей к полученным в лаборатории результатам измерений адгезионной прочности была оценена при помощи критериев согласия:

– Пирсона (критерий Хи-квадрат) получен при помощи ПМ Статистика (см. таблицу 2)  $\chi^2 = 0,23$ , что меньше табличного значения  $P(6;3) = 111$ , следовательно, по критерию согласия Пирсона теоретический закон распределения, предсказанный математической моделью, близок к фактическому. По результатам сравнений, полученных в ходе эксперимента, средними результатами микротвердости и расчетными по уравнению 2 получили: Различия между двумя распределениями могут считаться достоверными, если  $\chi^2_{\text{Эмп}}$  достигает или превышает  $\chi^2_{0,05}$ , и тем более достоверным, если  $\chi^2_{\text{Эмп}}$  достигает или превышает  $\chi^2_{0,01}$ .  $\chi^2_{\text{Эмп}} = 0,119$ , что меньше критического значения для уровней значимости 0,05 и 0,01 соответственно – 24,9 и 30,6. Поскольку  $\chi^2_{\text{Эмп}}$  меньше критического значения, расхождения между распределениями статистически не достоверны, следовательно, модель правильно предсказывает результаты.

По критерию Колмогорова, позволяющему оценить справедливость гипотезы о законе распределения при малых объемах наблюдений случайной величины, получили  $P[\lambda = 0,37] = 0,99$ . По результатам этой проверки был также сделан вывод о случайности расхождения между теоретическими и опытными результатами, а также о соответствии теоретического и фактического распределения.

<sup>9</sup> Юдин Ю. В., Майсурадзе М. В., Водолазский Ф. В. Организация и математическое планирование эксперимента: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 124 с.



По данным обработки результатов испытаний получены уравнения регрессии зависимости твердости по Виккерсу от варьируемых входных параметров в кодированных значениях переменных:

$$HB(x_1, x_2, x_3) = 7,57 - 0,1x_1 + 0,16x_2 + 0,35x_3 + 0,16x_1^2 - 0,24x_2^2 - 0,25x_3^2 - 0,43x_1x_2 + 0,3x_2x_3 - 0,15x_1x_3. \quad (2)$$

Все коэффициенты уравнения регрессии по критерию Стьюдента оказались значимые. Так дисперсия парных взаимодействий по результатам расчетов составила

$$s_{bij} = \frac{s_y^0}{n \cdot \sum_{i \neq j=1}^n (x_i \cdot x_j)^2} = \frac{0,54}{3 \cdot 8} = 0,023, \quad (3)$$

где дисперсия воспроизводимости в центре плана  $s_y^0 = \frac{\sum_{i=1}^k (y_i - \bar{y})^2}{k} = 0,54$ ;  $(\bar{y} = 7,28)$  – величина среднего значения отклика по всем центральным точкам плана;  $k$  – количество центральных точек плана;  $n$  – количество факторов в математической модели.

Следовательно, условие значимости коэффициентов при парных взаимодействиях выполнены:  $b_{ij} > |s_{bij} \cdot t|$ , поскольку

ку превысили по модулю произведение  $|s_{bij} \cdot t| = 0,031 \cdot 2,86 = 0,088$ . Табличное значение критерия Стьюдента определяли в Excel при помощи встроенной функции, имеющей синтаксис СТЬЮДРАСПОБР  $(0,01; 19) = 2,86$  для уровня доверительной вероятности 99% и числе степеней свободы  $s = N - 4 = 16 - 4 = 12$ .

Из таблицы 3 видно, что коэффициенты в уравнении регрессии признаны статистически значимыми по критерию  $p = 0,05$ , за исключением свободного члена уравнения, что подтвердило результаты расчетов по критерию Стьюдента.

Первый столбец справа в таблице 3 включает оценки коэффициентов для нелинейного уравнения регрессии при перекодированных значениях факторов. Первый и второй столбцы таблицы 3 дают готовые коэффициенты уравнения регрессии без их перекодирования. Но удобнее анализировать уравнения в перекодированных значениях факторов, когда масштабы всех четырех независимых факторов условно одинаковы и находятся в интервале от -1 до +1. Полученную при этом точность предсказания можно проанализировать по рисунку 4.

Таблица 3  
Оценки эффектов для определения уравнений регрессии  
Источник: составлено авторами.

Table 3  
Effect estimates for determining regression equations  
Source: compiled by the authors.

Оценки эффектов; R-кв.=.78014;Скор..45035 (Матрица итог.sta) 3 факторы, 1 Блоки; Остаточн.SS=.2993694 ЗП Отклик - твердость, кг/мм2							
Фактор	Эффект	Ст.Ош.	t(6)	p	-95. % Дов.Пред	+95. % Дов.Пред	Коэф.
Сред/Св.член	7.564569	0.385757	19.60967	0.000001	6.62066	8.508483	7.564569
(1)рН *10(L)	-0.199701	0.296114	-0.67441	0.525171	-0.92426	0.524863	-0.099850
рН *10(K)	0.312496	0.359527	0.86919	0.418153	-0.56723	1.192226	0.156248
(2)Температура, С(L)	0.305872	0.296114	1.03296	0.341451	-0.41869	1.030436	0.152936
Температура, С(K)	-0.482999	0.359527	-1.34343	0.227712	-1.36273	0.396731	-0.241500
(3)Плотность тока, А/дм2(L)	0.696946	0.296114	2.35365	0.056775	-0.02762	1.421510	0.348473
Плотность тока, А/дм2(K)	-0.500677	0.359527	-1.39260	0.213157	-1.38041	0.379053	-0.250339
1L на 2L	-0.850000	0.386891	-2.19700	0.070392	-1.79669	0.096688	-0.425000
1L на 3L	-0.300000	0.386891	-0.77541	0.467547	-1.24669	0.646688	-0.150000
2L на 3L	0.600000	0.386891	1.55082	0.171924	-0.34669	1.546688	0.300000

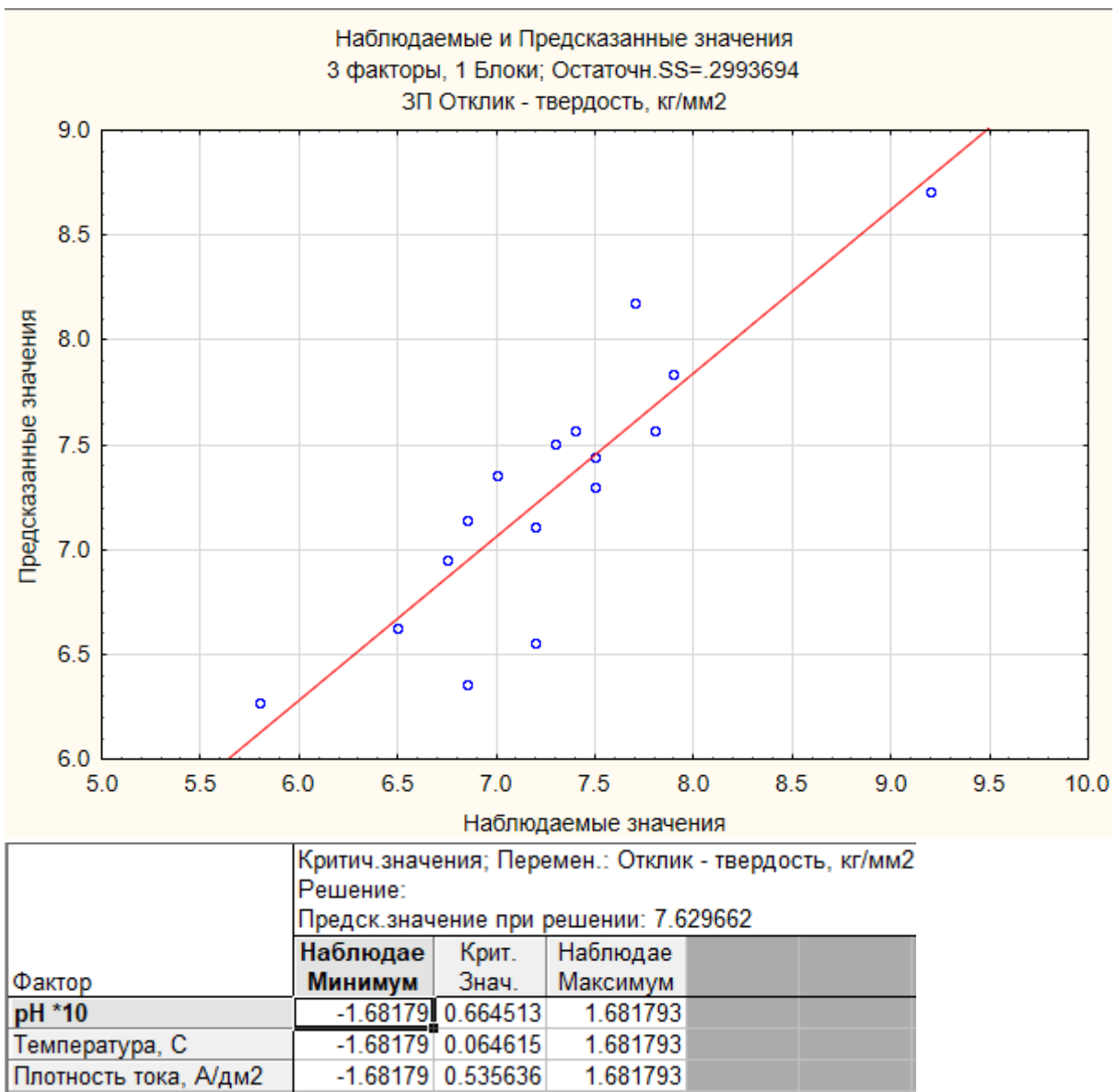


Рисунок 4 – Близость полученных средних значений отклика к предсказываемым моделью  
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Proximity of the obtained average response values to the predicted ones  
Source: compiled by the authors.

Задача математической модели – максимально точное описание всего факторного пространства, результаты представлены на рисунках 5, 6.

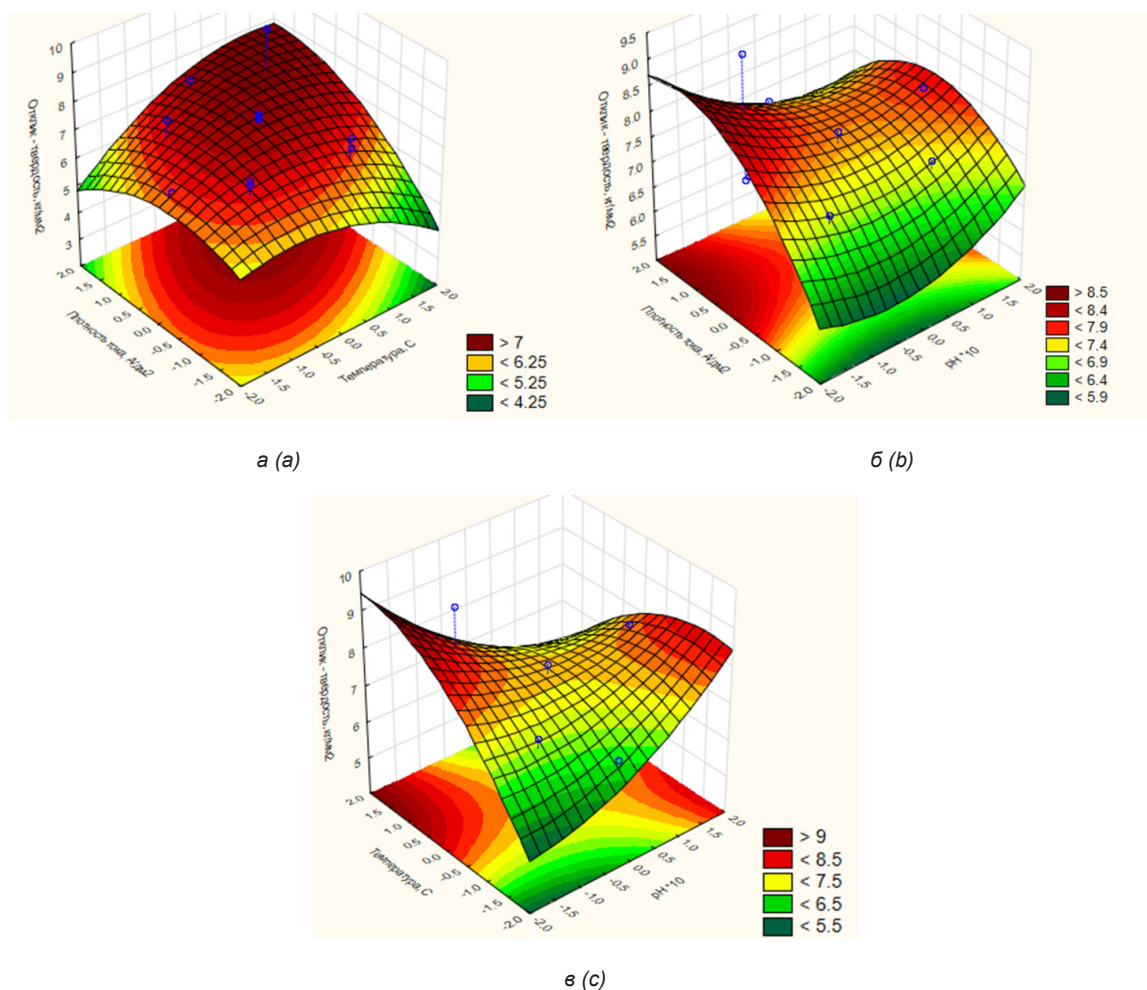


Рисунок 5 – Изображения полученных поверхностей микротвердости покрытия при проведении статистического анализа: а – поверхность отклика «твердость» от факторов «плотность тока» и «температура» в кодированных значениях факторов при pH на нулевом уровне; б – поверхность отклика «твердость» от факторов «плотность тока» и «pH» в кодированных значениях факторов при температуре на нулевом уровне; в – поверхность отклика «твердость» от факторов «температура» и «pH» в кодированных значениях факторов при плотности тока на нулевом уровне  
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Images of the obtained microhardness surfaces of the coating during statistical analysis: а – the surface of the response 'hardness' from the factors 'current density' and 'temperature' in the coded values of the factors at pH at zero; б – the surface of the response 'hardness' from the factors 'current density' and 'pH' in the coded values factors at a temperature at zero level; с – the surface of the response 'hardness' from the factors 'temperature' and 'pH' in the coded values of the factors at a current density at zero level  
Source: compiled by the authors.

Для более точного изучения вблизи факторного пространства около оптимального (максимального) значения отклика в ПМ Statistica есть модуль «Предсказания значений через функцию желательности», для получения которого можно задать полученные критические значения в кодированных переменных:  $x_1 = 0$ ;  $x_2 = 0$ ;  $x_3 = 0,6$ . Этому сочетанию факторов модель предсказывает значение отклика

$y = 795,6$  кг/мм<sup>2</sup>. При сочетании  $x_1 = x_2 = x_3 = 0$  соответствует отклик 7,57 в доверительном интервале от 6,5 до 8,5 с 95%-ным уровнем (см. рисунок 6). Как показывает анализ рисунка 8, наиболее значимыми факторами для получения желательности более 1 является сочетание факторов в кодированных значениях: «температура, оС»  $x_2 = 1,5...2,0$  и «плотность тока»  $x_1 = -2$  при фиксированном  $x_3 = 0,0$ .

Предсказ. знач.; Прм.:Отклик - твердость, кг/мм2; R-кв.=.78014 3 факторы, 1 Блоки; Остаточн.SS=.2993694 ЗП Отклик - твердость, кг/мм2			
Фактор	Регрес. Козф.	Знач.	Козф. * Знач.
Постоян.	7.564569		
(1)рН *10(L)	-0.099850	0.00	0.000000
рН *10(K)	0.156248	0.00	0.000000
(2)Температура, C(L)	0.152936	0.00	0.000000
Температура, C(K)	-0.241500	0.00	0.000000
(3)Плотность тока, А/дм2(L)	0.348473	0.00	0.000000
Плотность тока, А/дм2(K)	-0.250339	0.00	0.000000
1L на 2L	-0.425000	0.00	0.000000
1L на 3L	-0.150000	0.00	0.000000
2L на 3L	0.300000	0.00	0.000000
предсказан			7.564569
-95. % Дов.			6.620656
+95. % Дов.			8.508483
-95. % Пред.			5.926457
+95. % Пред.			9.202681

Рисунок 6 – Результаты предсказания моделью максимального значения отклика «твердость»  
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Results of the model's prediction of the maximum value of the 'hardness' response  
Source: compiled by the authors.

О том, насколько точно в центр факторного пространства попадает зависимость частоты от амплитуды УЗК, можно судить по контуру полученной поверхности, что мы и наблюдаем на поверхности отклика на рисунке 7, но границы варьирования факторов видны лучше на контурных линиях проекции. Отсюда можно сделать вывод, что дальнейшее увеличение плотности тока выше 1,0 в кодированных значениях нецелесообразно. И напротив, повышение температуры выше 0 в кодированных значениях при высоких уровнях рН нецелесообразно. Числовое значение экстремума функции получили, подставив в уравнение 2 значения  $x_1 = x_2 = 0$ , и нашли максимум твердости  $HB(x_3 = -0,7) = 782,3 \text{ кг/мм}^2$  из уравнения регрессии:

$$HB(x_3) = 7,57 - 0,35x_3 - 0,25x_3^2 \quad \text{или} \quad (4)$$

$$HB(x_3) = -0,25x_3^2 - 0,35x_3 + 7,57.$$

Влияние и вклад каждого фактора в общее повышение твердости покрытия можно заметить на рисунках 9 и 10: наибольшее увеличение твердости дают факторы  $x_3$  – плотность тока, парное воздействие  $x_2 \cdot x_3$  и температура  $x_2$ . Но в то же время парное сочетание воздействий  $x_1 \cdot x_3$  снижает отклик модели, о чем можно судить по отрицательной величине абсолютного значения эффекта. Остальные отрицательные коэффициенты абсолютного

влияния факторов на отклик свидетельствуют о явно выраженной квадратичной зависимости и наличии экстремума функции в виде максимума. При наиболее благоприятном сочетании факторов  $x_1, \dots, x_3$  можно получать и более высокие значения микротвердости до 800...900 кг/мм<sup>2</sup>, что даже выше, чем полученные на границах исследованного факторного пространства значения микротвердости. Это позволяет прогнозировать дальнейшее увеличение микротвердости при варьировании более узкого диапазона изменения факторов вблизи полученного оптимума по модели ОЦКП. Это еще раз подтверждает правило «створа» И. А. Рыбьева для любых композиционных материалов [21, 22]: наиболее экстремальному значению отклика соответствуют только наиболее оптимальные значения факторов.

На рисунке 9 видно, что оптимально высокие значения твердости получаются точно в середине интервалов варьирования уровня рН = 0,6 и температуры 40 °С. Максимум же плотности тока следует рассматривать в комплексе со снижением уровня рН, как видно на рисунке 5, б, в и рисунке 8. Отсюда следует вывод, что повышение значения рН раствора вместе с небольшим увеличением плотности катодного тока может дать экстремально высокие показатели микротвердости. Полученные зависимости хорошо согласуются с результатами анализа влияния условий осаждения на микротвердость получаемого покрытия [18].



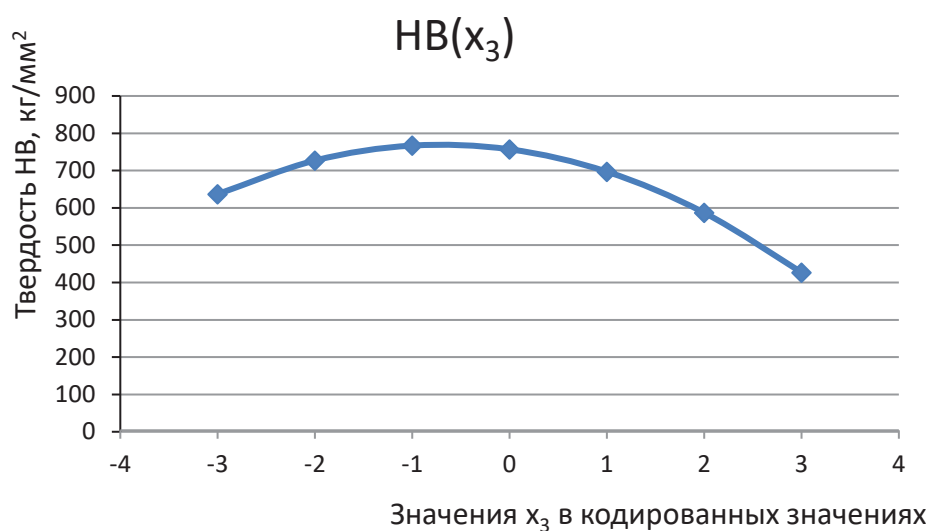


Рисунок 7 – Парабола, построенная по формуле (4)  
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – A parabola constructed according to formula 4  
Source: compiled by the authors.

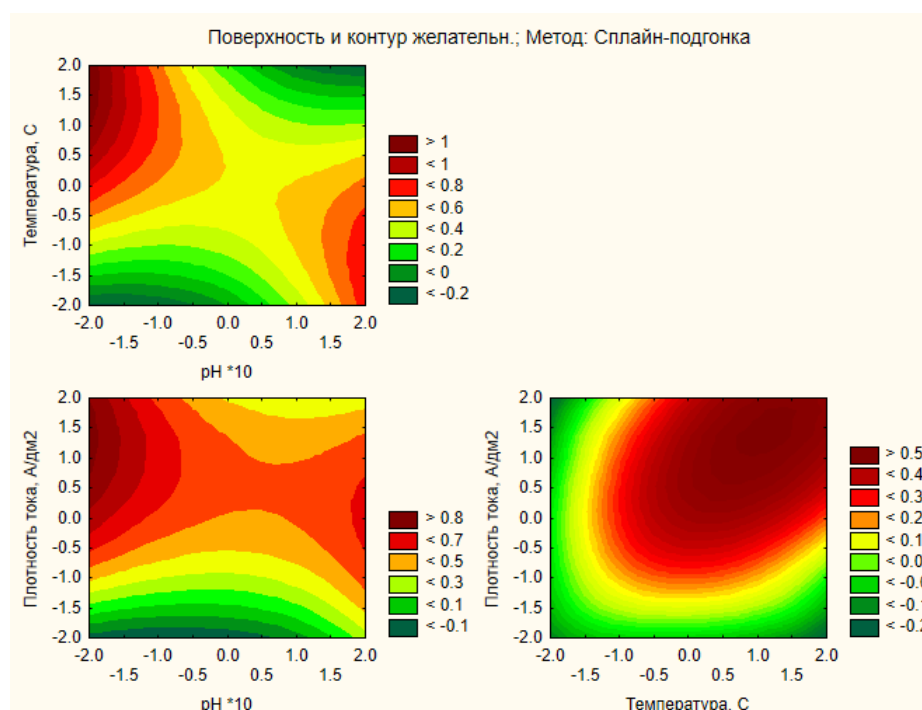


Рисунок 8 – Контурные линии поверхностей профиля желательности:  
за 1 принято предсказываемое моделью максимальное значение твердости 860 кг/мм²  
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Contour lines of desirability profile surfaces:  
the maximum hardness value of 860 kg/mm² predicted by the model is taken as 1  
Source: compiled by the authors.

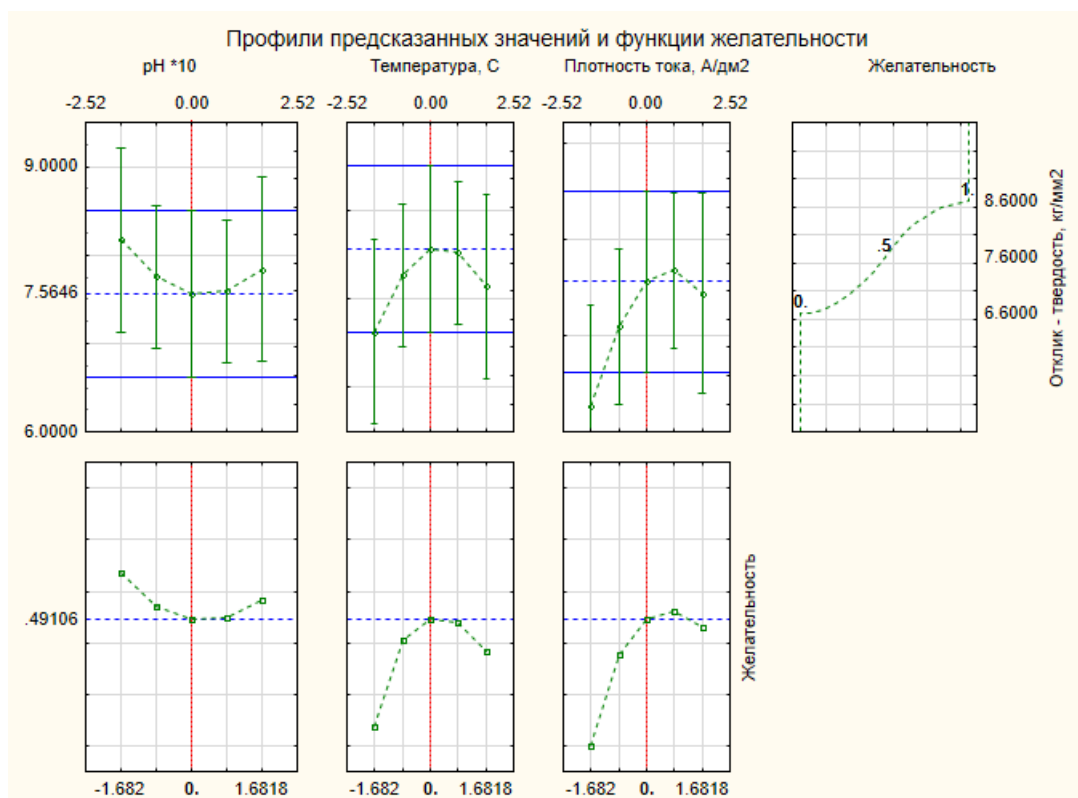


Рисунок 9 – Доверительные интервалы профиля желательности  
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Confidence intervals of the desirability profile  
Source: compiled by the authors.



Рисунок 10 – Карта Парето для коэффициентов регрессии  
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Pareto map for regression coefficients  
Source: compiled by the authors.

Наиболее обобщенным критерием предсказания зависимых параметров отклика от варьируемых независимых факторов является коэффициент детерминации модели по критерию  $R^2$ . И хотя предсказание благодаря ПМ Статистика выходит не ниже  $R^2 = 0,78$ , но общий коэффициент корреляции между предсказанными по уравнению регрессии значения отклика модели с получаемыми результатами замеров в лаборатории для данной математической модели, рассчитанные в Excel при помощи встроенной функции, имеющей синтаксис КОРРЕЛ от двух массивов  $y_{расч}$  по уравнению (2) и  $y_{ср}$ , было получено на уровне  $R^2 = 0,746$  можно также считать достаточно высоким уровнем предсказания математической модели.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволили определить оптимальные режимы осаждения и получить адекватную математическую модель зависимости микротвердости покрытия от переменных технологических условий осаждения (плотности тока, кислотности и температуры электролита).

Наилучшим образом описывает спрогнозированную модель уравнение регрессии, где наибольший вклад в увеличение микротвердости покрытия вносят факторы  $x_3$ ,  $x_2x_3$ ,  $x_2$  в порядке уменьшения влияния.

Наибольшее влияние на исследуемый выходной параметр модели имеет плотность тока и кислотность электролита. Поэтому крайне важным является необходимость контроля кислотности электролита, а также описание рекомендаций по корректировке кислотности при выполнении процесса восстановления деталей автомобилей.

На основании результатов математического моделирования выявлен доминантный фактор, определяющий повышение микротвердости покрытия в ходе восстановления деталей автомобильного транспорта. Результаты моделирования эксперимента позволяют судить о необходимости дополнительных исследований влияния плотности тока в области 60...80 А/Дм<sup>2</sup>, с целью повышения производительности и физико-механических свойств восстановленных деталей автомобильного транспорта.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Густов Ю. И., Орехов А. А. Исследование конструктивно-технологических и эксплуатационных показателей строительной техники // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4 (30). С. 470–475.
2. Мухаметшина Р. М. Трибологические отказы дорожно-строительных машин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 1–2. С. 252–255.

3. Котомчин А. Н., Синельников А. Ф. Усовершенствование холодного саморегулирующегося электролита хромирования при упрочнении и восстановлении деталей машин // Мир транспорта и технологических машин. 2019. № 4 (67). С. 17–24.

4. 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.

5. Котомчин А. Н., Синельников А. Ф. Установка для поддержания рабочей температуры электролитов при восстановлении деталей машин гальваническими покрытиями // Вестник СибАДИ. 2020. Т. 17, № 4 (74). С. 500–511.

6. Янута А. С., Синельников А. Ф. Высокие технологии и инновации в науке. Сборник избранных статей Международной научной конференции // Исследование влияния режимов осаждения на процесс осаждения сплава Fe-Cr из сульфатного электролита. Санкт-Петербург. 2021. С. 177–180.

7. Бомешко Е. В., Корнейчук Н. И. Электроосаждение двойных и тройных сплавов на основе железа и хрома: теоретические представления и практические рекомендации // Вестник ПГУ. 2019. Т. 3, № 53. С. 153–165.

8. Гурьянов Г. В., Кисель Ю. Е., Лысенко А. Н., Обозов А. А. Повышение износостойкости деталей электрохимическими сплавами на основе железа // Сельский механизатор. 2017. № 2. С. 34–35.

9. Янута А. С., Корнейчук Н. И., Синельников А. Ф. Анализ применения электролитов для получения электролитических сплавов Fe-Cr при восстановлении деталей машин и оборудования // Вестник ПГУ. 2021. № 3 (69). С. 101–106.

10. Жачкин С. Ю., Михайлов В. В., Гедзенко Д. В., Живогин А. А. Микротвердость композитных гальванических покрытий на основе железной матрицы // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8, № 6. С. 51–53.

11. Колмыков Д. В. Восстановление и упрочнение деталей автомобилей гальваническими покрытиями // Главный механик. 2010. № 10. С. 33–38.

12. Виноградов С. Н., Перелыгин Ю. П., Киреев С. Ю. Износостойкость и антифрикционные свойства гальванических покрытий. Методы определения // Гальванотехника и обработка поверхности. 2012. Т. 20, № 3. С. 53–56. EDN PESEYT.

13. Котомчин А. Н., Штефан Ю. В., Зорин В. А. Моделирование ограничений при оптимизации эффективности хромирования деталей машин // Вестник СибАДИ. 2020. Т. 17. № 6 (76). С. 736–752.

14. Хлыстов А. В., Бабенко В. А. Математическое моделирование и оптимизация режимов железнения в «горячих» хлористых электролитах на асимметричном токе // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2004. № 4 (5). С. 44–47.

15. Артемчук В. В., Босов А. А. Теоретические основы математического моделирования процессов электролитического покрытия // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. 2007. № 15. С. 52–56.

16. Афанасьев Е. А., Серебровский В. И., Серебровский В. В., Степанов Р. В., Степашова И. В. Электроосаждение бинарных покрытий на основе железа для упрочнения и восстановления деталей машин // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2012. № 7. С. 79–81.

17. Блинков Б. С., Серебровский В. В., Калущий Е. С. Электроосаждение сплавов на основе железа // Вестник Курской ГСХА. 2016. № 2. С. 67–71.

18. Серебровский В. И., Серебровский В. В., Сафронов Р. И., Гнездилова Ю. П. Упрочняющее легирование электроосажденного железа // Вестник Курской ГСХА. 2015. № 4. С. 68–71.

19. Гадалов В. Н., Сафонов С. В., Серебровский В. И., Скрипкина Ю. В., Горещкий В. В. Реновация машиностроительной и сельскохозяйственной техники гальваническими железохромистыми покрытиями с применением цемента // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9, № 4. С. 54–58.

20. Янута А. С. Исследование влияния режимов осаждения на структуру электролитического бинарного покрытия Fe-Cr, полученного из сульфатно-хлоридного электролита // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2020. № 3 (70). С. 17–21.

21. Sinelnikov A.F., Bomeshko E.V., Korneychuk N.I., Januta A.S. Electrolytic alloying of iron-chromium during deposition of coatings from a sulfate-chloride electrolyte // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (14th-16th December 2020, Moscow). Moscow. 2020. pp. 1-9.

22. Штефан Ю. В., Зорин В. А. Методы выявления и оценки рисков в дорожном строительстве и машиностроении: монография. Москва: МАДИ, 2017. 136 с.

23. 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.

## REFERENCES

1. Gustov Ju.I., Orekhov A.A. Issledovanie konstrukcionno-tehnologicheskikh i jekspluatacionnykh pokazatelej stroitel'noj tehniki [Research of structural, technological and operational indicators of construction equipment]. *Izvestija Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2014; 4 (30): 470-475. (In Russ.)

2. Muhametshina R. M. Tribologicheskie otказы dorozhno-stroitel'nyh mashin [Tribological failures of road construction machines]. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. 20216; T. 18, № 1-2, 2016: 252-255. (In Russ.)

3. Kotomchin A. N., Sinelnikov A. F. Usovershenstvovanie holodnogo samoregulirujushhegosja jelektrolita hromirovanija pri uprochnenii i vosstanovlenii detalej mashin [Improvement of cold self-regulating chromium plating electrolyte during strengthening and restoration of machine parts]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2019; 4 (67): 17-24. (In Russ.)

4. Kotomchin A. N., Sinelnikov A. F., Korneychuk N. I. Intensifikacija processa jelektroliticheskogo hromirovanija pri vosstanovlenii i uprochnenii detalej

mashin [Intensification of the electrolytic chrome plating process during the restoration and strengthening of machine parts]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin*. 2020; 3 (70): 22-32. (In Russ.)

5. 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>

6. Januta A. S., Sinelnikov A. F. Vysokie tehnologii i innovacii v nauke. Sbornik izbrannyh statej Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii [High technologies and innovations in science. Collection of selected articles of the International Scientific Conference]. *Issledovanie vlijanija rezhimov osazhdenija na process osazhdenija splava Fe-Cr iz sul'fatnogo jelektrolita*. Sankt-Peterburg. 2021:177-180. (In Russ.)

7. Bomeshko E. V., Korneychuk N. I. Jelektroosazhdenie dvojnyh i trojnyh splavov na osnove zheleza i hroma: teoreticheskie predstavlenija i prakticheskie rekomendacii [Electrodeposition of double and triple alloys based on iron and chromium: theoretical representations and practical recommendations]. *Vestnik PGU*. 2019; T. 3, № 53:153-165. (In Russ.)

8. Gur'janov G. V., Kisel' Ju. E., Lysenko A. N., Obozov A. A. Povyshenie iznosostojkosti detalej jelektrohromicheskimi splavami na osnove zheleza [Increasing wear resistance with iron-based parts]. *Sel'skij mehanizator*. 2017; 2, 2017: 34-35. (In Russ.)

9. Januta A.S., Korneychuk N.I., Sinelnikov A.F. Analiz primenenija jelektrolitov dlja poluchenija jelektroliticheskikh splavov Fe-Cr pri vosstanovlenii detalej mashin i oborudovanija [Analysis of the use of electrolytes for the production of Fe-Cr electrolytic alloys when restoring parts of machines and equipment]. *Vestnik PGU*. 2021; (69): 101-106. (In Russ.)

10. Zhachkin S. Ju., Mihajlov V. V., Gedzenko D. V., Zhivogin A. A. Mikrotverdost' kompozitnyh gal'vanicheskikh pokrytij na osnove zheleznoj matricy [Microhardness of composite galvanic coatings based on an iron matrix]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta*. 2012; T. 8, № 6: 51-53. (In Russ.)

11. Kolmykov D. V. Vosstanovlenie i uprochnenie detalej avtomobilej gal'vanicheskimi pokrytijami [Restoration and strengthening of car parts with galvanic coatings]. *Glavnyj mehanik*. 2010; 10, 2010: 33-38. (In Russ.)

12. Vinogradov S. N., Pereygin Ju. P., Kireev S. Ju. Iznosostojkost' i antifrikcionnye svojstva gal'vanicheskikh pokrytij. Metody opredelenija [Wear resistance and antifriction properties of galvanic coatings. Methods of determination]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverhnosti*. 2012; T. 20, № 3, 2012: 53-56. EDN PESEYT. (In Russ.)

13. Kotomchin A.N., Shtefan Yu.V., Zorin V.A. Simulation of current output during chrome plating of parts for hardening and car parts restoration. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020;17 (6): 736-753. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-6-736-752>

14. Hlystov A.V., Babenko V.A. Matematicheskoe modelirovanie i optimizacija rezhimov zheleznenija v



“gorjachih” hloristyh jeлектrolitah na asimmetrichnom toke [Mathematical modeling and optimization of iron plating modes in “hot” chloride electrolytes on asymmetric current]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2004. 4 (5), 2004: 44-47. (In Russ.)

15. Artemchuk V. V., Bosov A. A. Teoreticheskie osnovy matematicheskogo modelirovaniya processov jeлектroliticheskogo pokrytija [Theoretical bases of mathematical modeling of processes of electrodeposited coating]. *Visnik Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu im. akademika V. Lazariana*. 2007; 15, 2007: 52-56. (In Russ.)

16. Afanas'ev E. A., Serebrovskij V. I., Serebrovskij V. V., Stepanov R. V., Stepashova I. V. Jeлектroosazhdenie binarnykh pokrytij na osnove zheleza dlja uprochnenija i vosstanovlenija detalej mashin [Electrodeposition of binary coatings based on iron for strengthening and restoring machine parts]. *Vestnik Kurskoj gosudarstvennoj sel'skohozjajstvennoj akademii* 2012; 7, 2012: 79-81. (In Russ.)

17. Blinkov B. S., Serebrovskij V. V., Kaluckij E. S. Jeлектroosazhdenie splavov na osnove zheleza [Electrodeposition of iron-based alloys]. *Vestnik Kurskoj GSHA*. 2016; 2, 2016: 67-71. (In Russ.)

18. Serebrovskij V. I., Serebrovskij V. V., Safronov R. I., Gnezdilova Ju. P. Uprochnjajushhee legirovanie jeлектroosazhdenno zheleza [Strengthening doping of electrodeposited iron]. *Vestnik Kurskoj GSHA*. 2015; 4, 2015: 68-71. (In Russ.)

19. Gadulov V. N., Safonov S. V., Serebrovskij V. I., Skripkina Ju. V., Goreckij V. V. Renovacija mashinostroitel'noj i sel'skohozjajstvennoj tekhniki gal'vanicheskimi zhelezohromistymi pokrytijami s primeneniem cementacii [Renovation of machine-building and agricultural equipment with galvanic iron-chromium coatings using cementation]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013; T. 9 (4): 54-58. (In Russ.)

20. Januta A. S. Issledovanie vlijaniya rezhimov osazhdenija na strukturu jeлектroliticheskogo binarnogo pokrytija Fe-Cr, poluchennogo iz sul'fatno-hloridnogo jeлектrolita [Study of the influence of deposition modes on the structure of the electrolytic binary coating Fe-Cr obtained from sulfate-chloride electrolyte]. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2022; 3 (70), 2022: 17-21. (In Russ.)

21. Sinelnikov A. F., Bomeshko E. V., Korneychuk N. I., Januta A. S. Electrolytic alloying of iron-chromium during deposition of coatings from a sulfate-chloride electrolyte. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* (14th-16th December 2020, Moscow). Moscow. 2020. pp. 1-9.

22. Shtefan Ju. V., Zorin V. A. Metody vyjavlenija i ocenki riskov v dorozhnom stroitel'stve i mashinostroenii: monografija [Methods for identifying and assessing risks in road construction and mechanical engineering: monograph]. Moscow: MADI. 2017: 136.

23. Zorin V. A., Shtefan Ju. V., Timchenko M. I. Planirovanie jeksperimentov pri sozdanii detalej iz kompozicionnykh materialov [Planning experiments when creating parts from composite materials]. *Mehanizacija stroitel'stva*. 2018. 79 (4): 5-13. (In Russ.)

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

Янута А. С. Проведение эксперимента и обработка экспериментальных данных, составление уравнения регрессии, описание математической модели. Оформление статьи.

Штефан Ю. В. Выполнения работ по планированию эксперимента. Составление уравнения регрессии, описание математической модели.

Фёдоров В. К. Руководство темой исследования. Формулирование целей и задач исследований. Анализ состояния вопроса. Подготовка материала для статьи.

Корнейчук Н. И. Руководство темой исследования. Формулирование целей и задач исследований. Анализ состояния вопроса. Разработка методики проведения эксперимента. Подготовка материала для статьи.

## COAUTHORS' CONTRIBUTION

Anton S. Yanuta. An experiment and processing experimental data conducting, a regression equation compiling, a mathematical model describing. the article layout.

Yuri V. Shtefan. Work on experiment planning. Regression equation compilation, mathematical model description.

Valerii K. Fiodorov. Research topic guidance. Research goals and objectives statement. State of the issue analysis. Material for the article preparation.

Nikolai I. Korneychuk. Research topic guidance. Research goals and objectives statement. State of the issue analysis. Material for the article preparation. Methodology of the experiment development.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Янута Антон Сергеевич – аспирант кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин», SPIN-код: 2532-4888.

Штефан Юрий Витальевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин», SPIN-код: 7856-2194.

Фёдоров Валерий Константинович – д-р техн. наук, проф. кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин», SPIN-код: 2658-1813.

Корнейчук Николай Иванович – канд. техн. наук, проф. кафедры «Инженерные науки, промышленность и транспорт», SPIN-код: 7430-8174.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton S. Januta – Postgraduate student of the Motor and Road Vehicles Production and Repair Department, SPIN-код: 2532-4888.

Yuri V. Shtefan – Cand. of Sci., Associate Professor of the Motor and Road Vehicles Production and Repair Department, SPIN-код: 7856-2194.

Valerii K. Fiodorov – Dr. of Sci., Professor of the Motor and Road Vehicles Production and Repair Department, SPIN-код: 2658-1813.

Nikolai I. Korneychuk – Cand. of Sci., Professor of the Engineering Sciences, Industry and Transport Department, SPIN-код: 7430-8174.