

Вестник Курганской ГСХА. 2026. № 2 (58). С. 55-63

Vestnik Kurganskoy GSXA. 2026; (2-58): 55-63

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 621.357:621.9.047

Код ВАК 4.3.1

DOI: 10.52463/2227-4227_2026_58_55_63

EDN: DEXBWL

МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ НАТИРАНИЕМ

Раиль Рафисович Айндинов¹, Марат Рашитович Садыков^{2✉}, Ильдус Хафизович Гималтдинов³

^{1, 2, 3} Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия

¹ ajndinov@list.ru, <https://orcid.org/0009-0002-8451-4561>

² marat3012@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0009-0003-9335-6080>

³ tskazgau@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2297-8950>

Аннотация. Рассмотрены вопросы повышения эффективности восстановления изношенных деталей машин сельскохозяйственной техники методом электролитического натирания. Актуальность исследования обусловлена тем, что замена деталей связана со значительными затратами, продолжительным ремонтом и снижением технической готовности машинно-тракторного парка АПК. Показано, что в течение 5 лет накопленные затраты на замену деталей возрастают от 100 до 500 %, тогда как при восстановлении – от 58 до 290 %, что обеспечивает снижение суммарных затрат на 42 %. Целью исследования являлось выявление закономерностей изменения скорости осаждения металла при электролитическом натирании деталей сельскохозяйственной техники в зависимости от силы тока, усилия прижима и расхода электролита, а также разработка регрессионной математической модели для выбора рациональных режимов процесса. Исследования выполнены на основе полного факторного эксперимента с трехуровневым варьированием факторов. В качестве входных параметров приняты сила тока I , усилие прижима F и расход электролита Q , а в качестве выходного параметра – скорость осаждения металла v . Установлено, что скорость осаждения изменяется в пределах 740–1050 мкм/ч. Повышение силы тока от 4 до 16 А увеличивает скорость на 150–170 мкм/ч, усилия прижима от 10 до 110 Н – на 140–160 мкм/ч, расхода электролита от 0,2 до 1,8 мл/с – на 120–150 мкм/ч. Наиболее эффективная область режимов соответствует $F = 90$ –110 Н, $I = 13$ –16 А и $Q = 1,5$ –1,8 мл/с, где скорость осаждения достигает 1000–1050 мкм/ч. Разработана регрессионная модель процесса с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,92$.

Ключевые слова: электролитическое натирание, восстановление деталей, сельскохозяйственная техника, скорость осаждения металла, сила тока, усилие прижима, расход электролита, регрессионная модель.

Благодарности: работа финансировалась за счет средств бюджета ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет». Дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Для цитирования: Айндинов Р.Р., Садыков М.Р., Гималтдинов И.Х. Моделирование скорости осаждения металла при восстановлении деталей сельскохозяйственной техники электролитическим натиранием // Вестник Курганской ГСХА. 2026. № 2 (58). С.55-63. DOI: 10.52463/2227-4227_2026_58_55_63. EDN: DEXBWL.

Scientific article

MODELING OF METAL DEPOSITION RATE DURING RESTORATION OF AGRICULTURAL MACHINERY PARTS BY ELECTROLYTIC PLATING

Rail R. Aindinov¹, Marat R. Sadykov^{2✉}, Ildus Kh. Gimaltdinov³

^{1, 2, 3} Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia

¹ ajndinov@list.ru, <https://orcid.org/0009-0002-8451-4561>

² marat3012@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0009-0003-9335-6080>

³ tskazgau@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2297-8950>

Abstract. The article considers the issues of increasing the efficiency of restoring worn-out parts of agricultural machinery by electrolytic plating. The relevance of the study is due to the fact that the replacement of parts is associated with significant costs, long-time repairs and a decrease in the technical readiness of the agricultural machinery and tractor fleet. It is shown that over the course of 5 years, the accumulated cost of replacing parts increases from 100 to 500 %, while during restoration it increases from 58 to 290 %, which reduces total costs by 42 %. The purpose of the study was to identify patterns of changes in the rate of metal deposition during electrolytic plating of agricultural machinery parts, depending on the current strength, clamping force and electrolyte flow rate, as well as to develop a regression mathematical model for selecting

rational process modes. The research was carried out on the basis of a full factorial experiment with three-level variation of factors. The input parameters are the current strength I , the clamping force F and the electrolyte flow rate Q , and the metal deposition rate v as the output parameter. It is found that the deposition rate varies between 740–1,050 microns/h. Current strength increase from 4 to 16 A increases the rate by 150–170 microns/h, clamping forces from 10 to 110 N – by 140–160 microns/h, electrolyte consumption from 0.2 to 1.8 ml/s – by 120–150 microns/h. The most effective range of the modes corresponds to $F = 90$ –110 N, $I = 13$ –16 A and $Q = 1.5$ –1.8 ml/s, where the deposition rate reaches 1,000–1,050 $\mu\text{m/h}$. A regression model of the process with a coefficient of determination $R^2 = 0.92$ has been developed.

Keywords: electrolytic plating, restoration of parts, agricultural machinery, metal deposition rate, current strength, clamping force, electrolyte flow rate, regression model.

Acknowledgments: the work was funded by the budget of Kazan State Agrarian University. No additional grants were received to conduct or direct this particular study.

For citation: Aindinov R.R., Sadykov M.R., Gimaltdinov I.K. Modeling of metal deposition rate during restoration of agricultural machinery parts by electrolytic plating // Vestnik Kurganskoy GSHA. 2026; (2-58): 55-63. DOI: 10.52463/2227-4227_2026_58_55_63. EDN: DEXBWL. (In Russ).

Введение. Восстановление изношенных деталей сельскохозяйственной техники остается актуальной научно-технической задачей, поскольку их замена связана со значительными затратами, увеличением длительности ремонта и снижением технической готовности машинно-тракторного парка АПК [1; 2].

По графику (рисунок 1) в течение 5 лет накопленные затраты на замену детали возрастают от 100 до 500 %, тогда как при их восстановлении – от 58 до 290 %. Разница к пятому году составляет 210 %, что подтверждает более высокую экономическую эффективность восстановления деталей по сравнению с их заменой [3; 4].

Следовательно, восстановление изношенных деталей сельскохозяйственной техники является экономически и технологически обоснованным направлением повышения эффективности ремонтного производства [5; 6]. Снижение накопленных

затрат на 42 % по сравнению с полной заменой деталей подтверждает целесообразность использования восстановительных технологий [3; 7].

Особую значимость приобретают технологии, обеспечивающие повышение производительности восстановления и требуемое качество формируемых покрытий на деталях сельскохозяйственной техники [8; 9]. К числу таких технологий относится электролитическое натирание, эффективность которого во многом зависит от силы тока, усилия прижима и расхода электролита. Недостаточная изученность влияния указанных факторов на скорость осаждения металла обуславливает необходимость проведения исследований, направленных на выбор рациональных режимов процесса и разработку его регрессионной модели.

Целью исследования является выявление закономерностей изменения скорости осаждения металла при электролитическом натирании

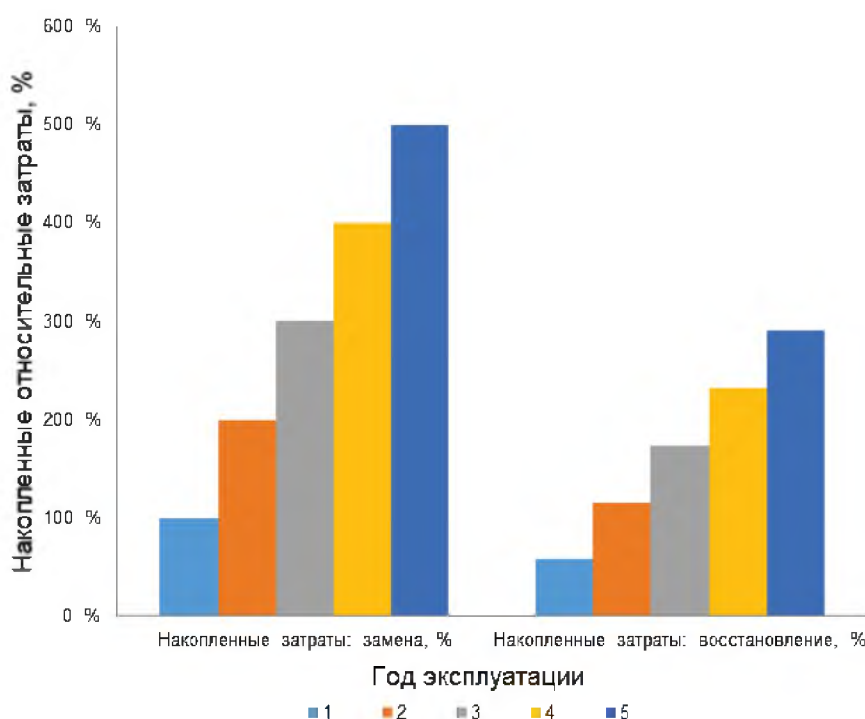


Рисунок 1 – Сравнение накопленных затрат на замену и восстановление деталей по годам эксплуатации

Figure 1 – Comparison of accumulated costs for replacement and restoration of parts by years of operation

деталей сельскохозяйственной техники в зависимости от силы тока, усилия прижима и расхода электролита, а также разработка регрессионной математической модели для выбора рациональных режимов процесса.

Материалы и методы. Исследование процесса электролитического натирания проводили на экспериментальной установке с варьированием основных технологических параметров, определяющих интенсивность осаждения металла. В качестве входных факторов были приняты сила тока I , А, усилие прижима F , Н, и расход электролита Q , мл/с. Диапазоны изменения факторов составляли: $I = 4\text{--}16$ А, $F = 10\text{--}110$ Н, $Q = 0,2\text{--}1,8$ мл/с. В качестве выходного параметра принимали скорость осаждения металла v , мкм/ч [10–12].

Планирование исследования осуществляли методом полного факторного эксперимента по трехуровневому плану, что позволило оценить как индивидуальное влияние исследуемых факторов, так и их совместное воздействие на скорость осаждения металла. Обработку полученных данных выполняли с использованием методов графического анализа, регрессионного моделирования и статистической оценки зависимостей [13–15].

Для анализа результатов строили поверхности отклика и двухфакторные зависимости скорости осаждения металла от силы тока, усилия прижима и расхода электролита. Адекватность полученной регрессионной модели оценивали по коэффициенту детерминации R^2 , остаточной сумме квадратов SS , распределению остатков и сопоставлению наблюдаемых и предсказанных значений выходного параметра. Дополнительно для обоснования актуальности восстановительных технологий выполняли сравнительный анализ накопленных затрат на замену и восстановление деталей по годам эксплуатации.

Результаты исследований и их обсуждение. Повышение эффективности процесса электролитического натирания деталей сельскохозяйственной техники напрямую связано с выбором рациональных технологических режимов, обеспечивающих высокую скорость осаждения металла. На данный показатель наибольшее влияние оказывают сила тока, усилие прижима и расход электролита, от которых зависят интенсивность электрохимического процесса и условия формирования покрытия.

По графику, изображенному на рисунке 2, скорость осаждения металла изменяется от 740 до 1050 мкм/ч. Минимальные значения наблюдаются при $F = 10$ Н и $I = 4$ А и составляют 730–760 мкм/ч. В средней области при $F = 50\text{--}70$ Н и $I = 9\text{--}11$ А скорость возрастает до 890–920 мкм/ч.

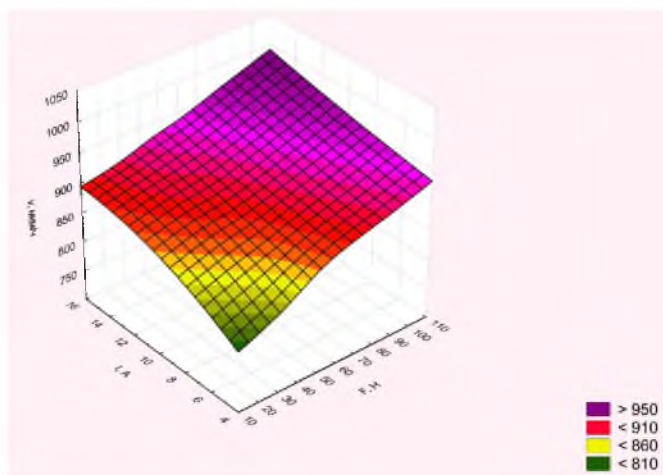


Рисунок 2 – Зависимость скорости осаждения металла v , мкм/ч, от усилия прижима F , Н, и силы тока I , А

Figure 2 – Dependence of the metal deposition rate v , $\mu\text{m/h}$, on the clamping force F , N, and the current strength I , A

С увеличением силы тока от 4 до 16 А скорость осаждения увеличивается на 150–170 мкм/ч. При увеличении усилия прижима от 10 до 110 Н прирост составляет 140–160 мкм/ч. Максимальные значения 1020–1050 мкм/ч достигаются при $F = 100\text{--}110$ Н и $I = 15\text{--}16$ А. Оба фактора положительно влияют на скорость осаждения металла, а наиболее эффективная область режима находится при $F = 90\text{--}110$ Н и $I = 13\text{--}16$ А, где обеспечивается максимальная производительность процесса.

По графику рисунок 3 скорость осаждения металла изменяется от 760 до 1030–1050 мкм/ч. Минимальные значения наблюдаются при $F = 10$ Н и $Q = 0,2$ мл/с и составляют 760–790 мкм/ч. В средней области, при $F = 50\text{--}70$ Н и $Q = 0,9\text{--}1,2$ мл/с, скорость находится в пределах 880–940 мкм/ч.

При увеличении расхода электролита от 0,2 до 1,8 мл/с скорость осаждения возрастает на 120–150 мкм/ч. При увеличении усилия прижима от 10 до 110 Н прирост составляет 130–160 мкм/ч. Максимальные значения 1000–1050 мкм/ч достигаются при $F = 100\text{--}110$ Н и $Q = 1,6\text{--}1,8$ мл/с. Оба фактора положительно влияют на скорость осаждения металла. Наиболее эффективная область режима соответствует $F = 90\text{--}110$ Н и $Q = 1,5\text{--}1,8$ мл/с, где обеспечивается максимальная скорость осаждения порядка 1000–1050 мкм/ч.

По графику рисунок 4 скорость осаждения металла изменяется от 760 до 1000 мкм/ч. Минимальные значения наблюдаются при $I = 4$ А и $Q = 0,2$ мл/с и составляют 760–800 мкм/ч. В средней области, при $I = 9\text{--}11$ А и $Q = 0,8\text{--}1,2$ мл/с, скорость осаждения находится в пределах 880–930 мкм/ч.

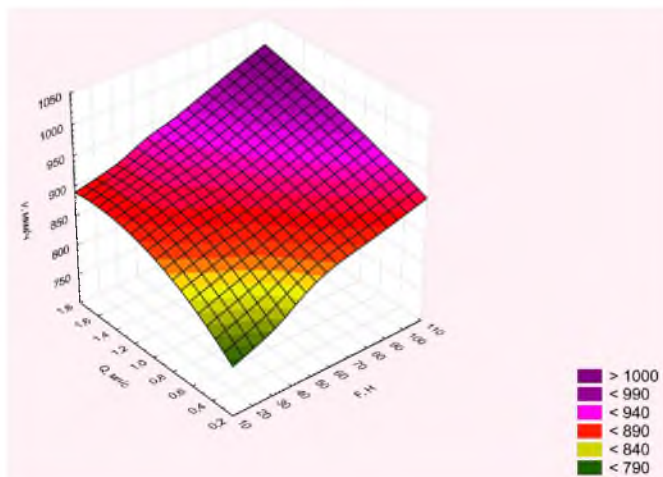


Рисунок 3 – Зависимость скорости осаждения металла v , мкм/ч, от усилия прижима F , Н, и расхода электролита Q , мл/с

Figure 3 – Dependence of the metal deposition rate v , $\mu\text{m/h}$, on the clamping force F , N , and the electrolyte flow rate Q , ml/s

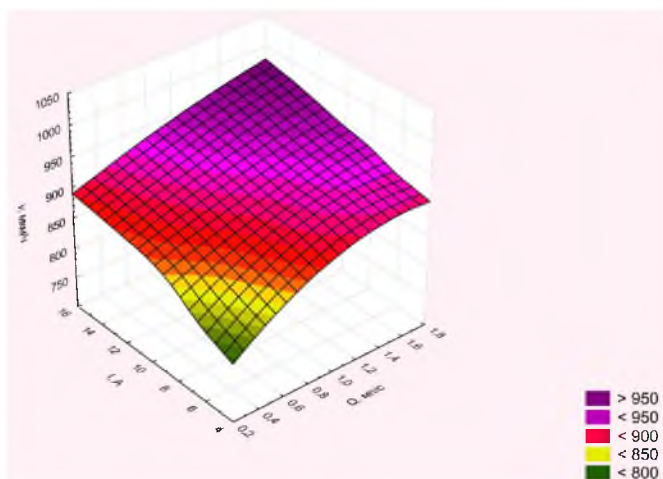


Рисунок 4 – Зависимость скорости осаждения металла v , мкм/ч, от силы тока I , А, и расхода электролита Q , мл/с

Figure 4 – Dependence of the metal deposition rate v , $\mu\text{m/h}$, on the current strength I , A , and electrolyte flow rate Q , ml/s

При увеличении силы тока от 4 до 16 А скорость возрастает на 100–130 мкм/ч. При увеличении расхода электролита от 0,2 до 1,8 мл/с прирост составляет 90–120 мкм/ч. Максимальные значения, близкие к 970–1000 мкм/ч, достигаются при $I = 14\text{--}16$ А и $Q = 1,6\text{--}1,8$ мл/с. Оба фактора положительно влияют на скорость осаждения металла. Наиболее эффективная область режима находится при $I = 14\text{--}16$ А и $Q = 1,5\text{--}1,8$ мл/с, где обеспечивается наибольшая скорость осаждения, достигающая 970–1000 мкм/ч.

По результатам регрессионного анализа (таблица) скорость осаждения металла v описывается моделью с высоким коэффициентом де-

терминации $R^2 = 0,92$, то есть модель объясняет 92 % изменения выходного параметра. Остаточная сумма квадратов составляет $SS = 270,1704$, что подтверждает хорошую точность аппроксимации.

Наибольшее влияние на скорость осаждения оказывает расход электролита Q , мл/с. Его линейный коэффициент равен 109,0123 (при $p = 0,0092$), что указывает на статистически значимое положительное влияние. Линейный эффект силы тока I также положительный, коэффициент составляет 8,3556, но статистически незначим, при $p = 0,1391$. Для усилия прижима F линейный коэффициент равен 0,9806, а уровень значимости $p = 0,0701$, то есть его влияние выражено слабее. Квадратичные эффекты всех факторов статистически незначимы: для I , $p = 0,6020$, для F , $p = 0,9479$, для Q , $p = 0,1699$.

В исследуемом диапазоне на скорость осаждения металла главным образом влияет расход электролита, тогда как сила тока и усилие прижима оказывают положительное, но менее выраженное воздействие.

На основании результатов полного факторного эксперимента разработана регрессионная математическая модель, устанавливающая количественную зависимость скорости осаждения металла v , мкм/ч, от силы тока I , А, усилия прижима F , Н, и расхода электролита Q , мл/с. Регрессионная модель скорости осаждения металла имеет вид:

$$v = 705,7716 + 8,3556I - 0,1422I^2 + 0,9806F + 0,0003F^2 + 109,0123Q - 26,5432Q^2, \quad (1)$$

где v – скорость осаждения металла, мкм/ч;

I – сила тока, А;

F – усилие прижима, Н;

Q – расход электролита, мл/с.

Значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,92$ свидетельствует о высокой степени адекватности полученной математической модели.

По гистограмме, представленной на рисунке 5, основная часть остатков сосредоточена в интервале от -10 до +10 мкм/ч. Наибольшая частота наблюдается вблизи нулевой области, что указывает на хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений. Положительные остатки достигают +25...+30 мкм/ч, отрицательные – -10 мкм/ч для основной массы наблюдений.

На рисунке 5 присутствует один резко выбивающийся отрицательный остаток на уровне около -55...-60 мкм/ч. Это свидетельствует о наличии единичного отклоняющегося опыта. Однако большая часть значений сгруппирована компактно около нуля, а остаточная сумма квадратов составляет $SS = 270,1704$, что подтверждает приемлемую точность модели.

Таблица – Результаты регрессионного анализа влияния силы тока, усилия прижима и расхода электролита на скорость осаждения металла

Table – Results of the regression analysis of the effect of current strength, clamping force and electrolyte consumption on the metal deposition rate.

Фактор	Коэффициент	Стандартная ошибка	t(20)	p	Нижняя граница -95 % доверительного интервала	Верхняя граница +95 % доверительного интервала
Свободный член	705,7716	30,97402	22,78592	0,000000	641,1609	770,3823
(1)I, A(L)	8,3556	5,42389	1,54051	0,139109	-2,9585	19,6696
I, A(K)	-0,1422	0,26841	-0,52986	0,602040	-0,7021	0,4177
(2)F, H(L)	0,9806	0,51251	1,91324	0,070141	-0,0885	2,0496
F, H(K)	0,0003	0,00419	0,06623	0,947850	-0,0085	0,0090
(3)Q, мл/с(L)	109,0123	37,83462	2,88129	0,009231	30,0907	187,9340
Q, мл/с(K)	-26,5432	18,63978	-1,42401	0,169860	-65,4251	12,3387

Распределение остатков в целом сосредоточено около нуля, что указывает на адекватность разработанной регрессионной модели, а основная ошибка прогноза не превышает ± 10 мкм/ч.

По графику (рисунок 6) наблюдаемые значения находятся в диапазоне 740–1015 мкм/ч, а предсказанные – 800–1005 мкм/ч. Основная часть точек располагается вблизи линии $y = x$, что указывает на хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных. Для большинства опытов расхождение не превышает 5–15 мкм/ч.

Наиболее плотная группа точек сосредоточена в области 860–960 мкм/ч, где модель показывает наибольшую точность. В верхнем диапазоне, 980–1015 мкм/ч, также сохраняется хорошее соответствие расчетных

и наблюдаемых значений. При этом имеется одна точка с заметным отклонением в области наблюдаемого значения около 740 мкм/ч, что связано с единичным выбросом.

Близкое расположение большинства точек к линии равенства свидетельствует об адекватности регрессионной модели и хорошей точности скорости осаждения металла. Модель корректно описывает экспериментальные данные во всем исследуемом диапазоне, за исключением одного опыта с отклонением.

На рисунке 7 скорость осаждения металла v изменяется по опытам от 740 до 1050 мкм/ч. Минимальное значение наблюдается в 1-м опыте, а максимальное – в 27-м. Общий прирост составляет 310 мкм/ч, или около 42 %.

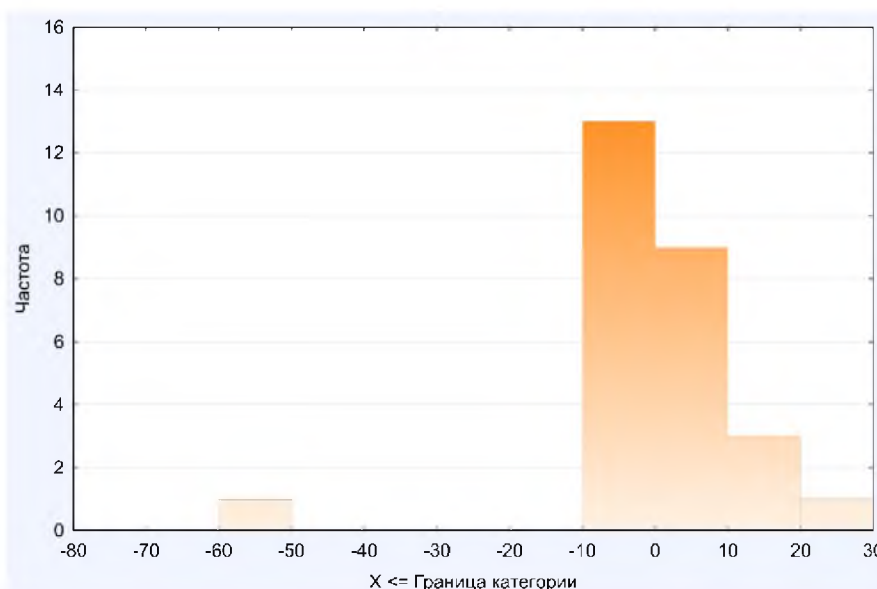


Рисунок 5 – Гистограмма распределения исходных остатков регрессионной модели скорости осаждения металла v , мкм/ч

Figure 5 – Histogram of the distribution of the initial residues of the regression model of the metal deposition rate v , $\mu\text{m}/\text{h}$

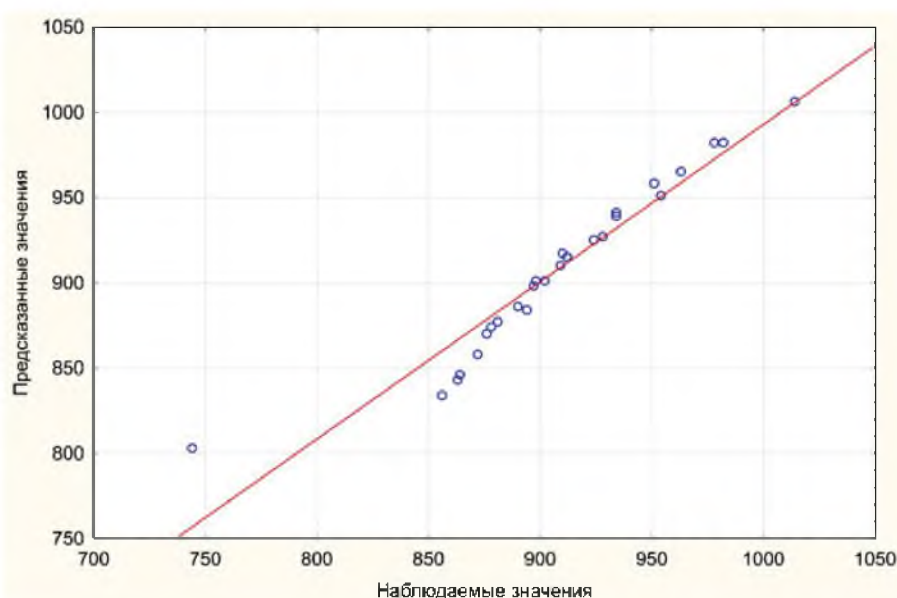


Рисунок 6 – Соотношение наблюдаемых и предсказанных значений скорости осаждения металла v , $\mu\text{м/ч}$

Figure 6 – The ratio of the observed and predicted values of the metal deposition rate v , $\mu\text{м/ч}$

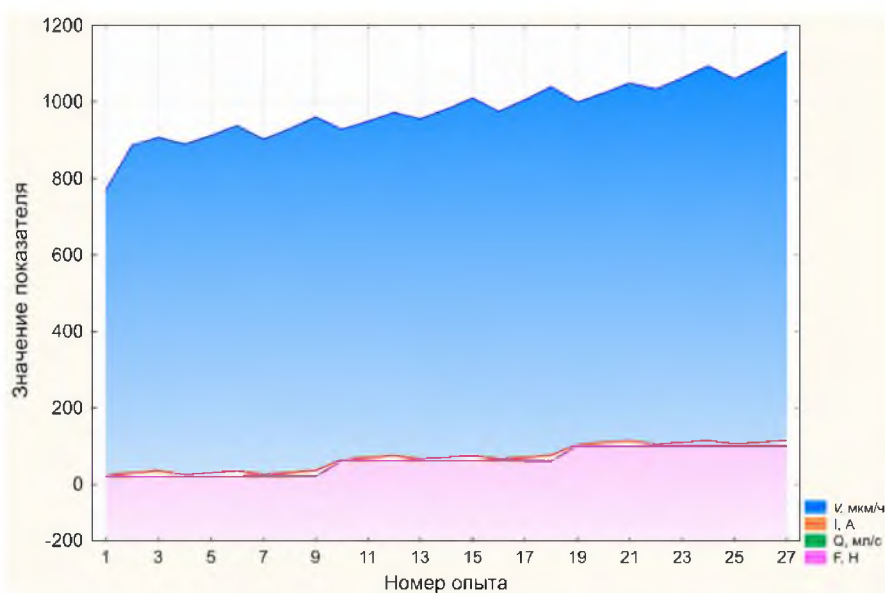


Рисунок 7 – Наложенный график изменения скорости осаждения металла v , $\mu\text{м/ч}$, силы тока I , A , расхода электролита Q , мл/с , и усилия прижима F , N , по опытам полного факторного эксперимента

Figure 7 – Superimposed graph of changes in the metal deposition rate v , $\mu\text{м/ч}$, current strength I , A , electrolyte flow rate Q , мл/с , and clamping force F , N , according to the experiments of the full factorial experiment

При переходе от первых опытов к последним одновременно возрастают и технологические параметры. Сила тока I увеличивается от 4 до 15 A , усилие прижима F – от 10 до 110 N , расход электролита Q – от 0,2 до 1,8 мл/с . На этом фоне скорость осаждения возрастает ступенчато, без резких спадов, что указывает на положительное совместное влияние всех трех факторов. Наиболее заметный рост v наблюдается при переходе к опытам

с $F = 60\text{--}100\text{ Н}$, $Q = 1,0\text{--}1,6\text{ мл/с}$ и $I = 10\text{--}15\text{ А}$, где скорость повышается до 950–1050 $\mu\text{м/ч}$.

Наложенный график показывает, что увеличение силы тока, усилия прижима и расхода электролита сопровождается ростом скорости осаждения металла. Максимальные значения v достигаются в опытах с наибольшими уровнями всех трех факторов, что подтверждает целесообразность их комплексного повышения для интенсификации процесса.

По результатам исследования установлено, что скорость осаждения металла при электролитическом натирании возрастает с увеличением силы тока, усилия прижима и расхода электролита. Наиболее высокие значения скорости осаждения, достигающие 1000–1050 мкм/ч, обеспечиваются в области повышенных значений факторов: $F = 90\text{--}110\text{ Н}$, $I = 13\text{--}16\text{ А}$ и $Q = 1,5\text{--}1,8\text{ мл/с}$. Регрессионный анализ показал, что наибольшее влияние на выходной параметр оказывает расход электролита, а разработанная математическая модель с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,92$ адекватно описывает экспериментальные данные. Анализ остатков и сопоставление наблюдаемых и предсказанных значений подтвердили хорошую точность модели и возможность ее использования для выбора рациональных режимов процесса электролитического натирания.

Заключение. Установлено, что скорость осаждения металла при электролитическом натирании изменяется в пределах 740–1050 мкм/ч, а общий диапазон ее изменения составляет 310 мкм/ч. Повышение силы тока от 4 до 16 А приводит к увеличению скорости осаждения на 150–170 мкм/ч, а увеличение усилия прижима от 10 до 110 Н – на 140–160 мкм/ч. Максимальные значения 1020–1050 мкм/ч достигаются при $F = 100\text{--}110\text{ Н}$ и $I = 15\text{--}16\text{ А}$.

Определено, что при увеличении расхода электролита от 0,2 до 1,8 мл/с скорость осаждения возрастает на 120–150 мкм/ч. При $F = 100\text{--}110\text{ Н}$ и $Q = 1,6\text{--}1,8\text{ мл/с}$ скорость осаждения составляет 1000–1050 мкм/ч, а при совместном повышении силы тока и расхода электролита до $I = 14\text{--}16\text{ А}$ и $Q = 1,6\text{--}1,8\text{ мл/с}$ достигает 970–1000 мкм/ч. Наиболее эффективная область режимов соответствует $F = 90\text{--}110\text{ Н}$, $I = 13\text{--}16\text{ А}$ и $Q = 1,5\text{--}1,8\text{ мл/с}$.

На основании полного факторного эксперимента разработана регрессионная математическая модель процесса, описывающая зависимость скорости осаждения металла от силы тока, усилия прижима и расхода электролита. Коэффициент детерминации модели составил $R^2 = 0,92$, остаточная сумма квадратов – $SS = 270,1704$, что подтверждает ее высокую адекватность. Установлено, что наибольшее влияние на скорость осаждения оказывает расход электролита, для которого линейный коэффициент регрессии составил 109,0123, при $p = 0,0092$.

Подтверждено, что разработанная модель достаточно точно описывает экспериментальные данные: основная часть остатков находится в интервале от -10 до +10 мкм/ч, а расхождение между наблюдаемыми и предсказанными значениями для большинства опытов не превышает

5–15 мкм/ч. Это позволяет использовать полученную математическую модель для выбора рациональных режимов электролитического натирания.

Список источников

1. Лапаев А.В., Мельников О.М. Методика расчета толщины ремонтной тонкостенной втулки для восстановления оптимального натяга в соединении «вал - манжета» // Техника и оборудование для села. 2025. № 1 (331). С. 31-34. DOI: 10.33267/2072-9642-2025-1-31-34. EDN: LUBFOR.
2. Preparation and Characterization of Electrodeposited Ni-Al₂O₃ Coatings Applied to Cylinder Liner / Ch. Li [et al.] // Crystals. 2026. Vol. 16. No. 1. P. 25. DOI: 10.3390/cryst16010025. EDN: QSFDDWA.
3. Theory and Practice of Substantiation of Electroplating Modes by Electrolytic Rubbing / M. Sadykov [et al.] // III International Scientific and Practical Symposium «Materials Science and Technology» (MST-III-2023): AIP Conference Proceedings. 2024. P. 20054. DOI: 10.1063/5.0201265. EDN: FESWIG.
4. Experimental Investigation and Optimization of the Electrodeposition Parameters of Ni-Al₂O₃ Composite Coating Using the Taguchi Method / I. Reddah [et al.] // Coatings. 2025. Vol. 15. No. 4. P. 482. DOI: 10.3390/coatings15040482. EDN: WWGYSZ.
5. Study of the influence of internal stresses on the microstructure of coatings during electrolytic rubbing / I. Gimaltdinov [et al.] // Eurasian Physical Technical Journal. 2026. Vol. 23. No. 1 (55). Pp. 15-23. DOI: 10.31489/2026N1/15-23.
6. Исследование параметров электролитического проточного осталивания для восстановления коленчатых валов / И.Х. Гималтдинов [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2025. Т. 20. № 3 (79). С. 68-77. DOI: 10.12737/2073-0462-2025-20-3-68-77. EDN: OIZKEU.
7. Излучатели для сверхвысокочастотных конвективных установок. Результаты моделирования / А.А. Васильев [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2024. Т. 19. № 1 (73). С. 34-41. DOI: 10.12737/2073-0462-2024-34-41. EDN: AZFSSO.
8. Разработка технологии и установки для восстановления посадочных мест под подшипники в корпусных деталях электролитическим натиранием / И.Х. Гималтдинов [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2025. Т. 20. № 2 (78). С. 79-86. DOI: 10.12737/2073-0462-2025-79-86. EDN: LLECFJ.

9. К формированию модели эффективности функционирования сельскохозяйственного трактора в составе МТА при работе на альтернативных видах топлива / А.А. Глущенко [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2024. Т. 19. № 1 (73). С. 42-47. DOI: 10.12737/2073-0462-2024-42-47. EDN: DALGJF.

10. Миронов Д.А., Ламм А.К., Расулов Р.К. Оценка эффективности метода селективного лазерного спекания для упрочнения почвообрабатывающих рабочих органов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2024. Т. 19. № 2 (74). С. 83-89. DOI: 10.12737/2073-0462-2024-83-89. EDN: WUWFS.

11. Multi-Physics Simulation and Optimization of Jet Electrodeposition for Ni-Diamond Composite Coatings / X. Wang [et al.] // Metals. 2024. Vol. 14. No. 8. P. 868. DOI: 10.3390/met14080868. EDN: TCNOUM.

12. Optimization of Deposition Parameters for Ni-P-WC-BN(h) Composite Coatings via Orthogonal Experimentation and Wear Behavior of the Optimized Coating / Y. Li [et al.] // Metals. 2025. Vol. 15. No. 7. P. 714. DOI: 10.3390/met15070714. EDN: JDHOWE.

13. Тенденции развития сельскохозяйственных тракторов тягового класса 0,6 / В.Ф. Федоренко [и др.] // Техника и оборудование для села. 2025. № 7 (337). С. 14-19. DOI: 10.33267/2072-9642-2025-7-14-19. EDN: PPVMOL.

14. Комаров В.А., Шабанов Г.И. Разработка программного обеспечения для учета расхода запасных частей // Техника и оборудование для села. 2025. № 3 (333). С. 33-36. DOI: 10.33267/2072-9642-2025-3-33-36. EDN: NGHYOB.

15. Повышение результативности научно-технических разработок для органического земледелия / Б.Г. Зиганшин [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18. № 3 (71). С. 84-91. DOI: 10.12737/2073-0462-2023-84-91. EDN: ORUNMR.

References

1. Lapaev A.V., Melnikov O.M. Metodika rascheta tolshchiny remontnoi tonkostennoi vtulki dlya vosstanovleniya optimal'nogo natyaga v soedinenii «val - manzheta» [Method for calculating the thickness of a thin-walled repair bushing to restore optimal tension in a shaft-to-sleeve connection]. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2025; 1(331): 31-34.

DOI: 10.33267/2072-9642-2025-1-31-34.
EDN: LUBFOR. (In Russ).

2. Li Ch. [et al.] Preparation and Characterization of Electrodeposited Ni-Al₂O₃ Coatings Applied to Cylinder Liner. *Crystals*. 2026; 16(1): 25. DOI: 10.3390/cryst16010025. EDN: QSFDDA.

3. Sadykov M. [et al.] Theory and Practice of Substantiation of Electroplating Modes by Electrolytic Rubbing. *III International Scientific and Practical Symposium «Materials Science and Technology» (MST-III-2023): AIP Conference Proceedings*. 2024: 20054. DOI: 10.1063/5.0201265. EDN: FESWIG.

4. Reddah I. [et al.] Experimental Investigation and Optimization of the Electrodeposition Parameters of Ni-Al₂O₃ Composite Coating Using the Taguchi Method. *Coatings*. 2025; 15(4): 482. DOI: 10.3390/coatings15040482. EDN: WWGYSZ.

5. Gimaltdinov I. [et al.] Study of the influence of internal stresses on the microstructure of coatings during electrolytic rubbing. *Eurasian Physical Technical Journal*. 2026; 23(1-55): 15-23. DOI: 10.31489/2026N1/15-23.

6. Gimaltdinov I.Kh. [et al.] Issledovanie parametrov ehlektroliticheskogo protochnogo ostalivaniya dlya vosstanovleniya kolenchatykh valov [Study of parameters of electrolytic flow tinning for restoration of crankshafts]. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2025; 20(3-79): 68-77. DOI: 10.12737/2073-0462-2025-20-3-68-77. EDN: OIZKEU. (In Russ).

7. Vasiliev A.A. [et al.] Izluchateli dlya sverkhvysokochastotnykh konvektivnykh ustanovok. Rezul'taty modelirovaniya [Emitters for microwave convection systems. Simulation results]. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2024; 19(1-73): 34-41. DOI: 10.12737/2073-0462-2024-34-41. EDN: AZFSSO. (In Russ).

8. Gimaltdinov I.Kh. [et al.] Razrabotka tekhnologii i ustanovki dlya vosstanovleniya posadochnykh mest pod podshipniki v korpusnykh detalyakh ehlektroliticheskim natiraniem [Development of a technology and installation for restoring bearing seats in housing parts using electrolytic rubbing]. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2025; 20(2-78): 79-86. DOI: 10.12737/2073-0462-2025-79-86. EDN: LLECFJ. (In Russ).

9. Glushchenko A.A. [et al.] K formirovaniyu modeli ehffektivnosti funktsionirovaniya sel'skoxozyaistvennogo traktora v sostave MTA pri rabote na al'ternativnykh vidakh topliva [Towards the formation of a model for the efficiency of an agricultural tractor as part of a multi-purpose vehicle when operating on alternative fuels]. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2024; 19(1-73): 42-47. DOI: 10.12737/2073-0462-2024-42-47. EDN: DALGJF. (In Russ).

10. Mironov D.A., Lamm A.K., Rasulov R.K. Otsenka effektivnosti metoda selektivnogo lazernogo spekaniya dlya uprochneniya pochvo-obrabatyvayushchikh rabochikh organov [Evaluation of the effectiveness of the selective laser sintering method for strengthening soil-cultivating working tools]. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2024; 19(2-74): 83-89. DOI: 10.12737/2073-0462-2024-83-89. EDN: WUUWFS. (In Russ).

11. Wang X. [et al.] Multi-Physics Simulation and Optimization of Jet Electrodeposition for Ni-Diamond Composite Coatings. *Metals*. 2024; 14(8): 868. DOI: 10.3390/met14080868. EDN: TCNOUM.

12. Li Y. [et al.] Optimization of Deposition Parameters for Ni-P-WC-BN(h) Composite Coatings via Orthogonal Experimentation and Wear Behavior of the Optimized Coating. *Metals*. 2025; 15(7): 714. DOI: 10.3390/met15070714. EDN: JDHOWE.

13. Fedorenko V.F. [et al.] Tendentsii razvitiya sel'skokhozyaistvennykh traktorov tyagovogo klassa 0,6 [Development trends of agricultural tractors of traction class 0.6]. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2025; 7(337): 14-19. DOI: 10.33267/2072-9642-2025-7-14-19. EDN: PPVMOL. (In Russ).

14. Komarov V.A., Shabanov G.I. Razrabotka programmynogo obespecheniya dlya ucheta raskhoda zapasnykh chastei [Development of software for accounting of spare parts consumption]. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2025; 3(333): 33-36. DOI: 10.33267/2072-9642-2025-3-33-36. EDN: NGHYOB. (In Russ).

15. Ziganshin B.G. [et al.] Povyshenie rezul'tativnosti nauchno-tehnicheskikh razrabotok dlya organicheskogo zemledeliya [Improving the effectiveness of scientific and technological developments for organic farming]. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2023; 18(3-71): 84-91. DOI: 10.12737/2073-0462-2023-84-91. EDN: ORUNMR. (In Russ).

ВКЛАД АВТОРОВ

Айндинов Р.Р. – сбор и анализ данных; написание исходного текста; обзор литературы по теме; итоговые выводы.

Садыков М.Р. – концепция исследования; развитие методологии; написание исходного текста; итоговые выводы.

Гималтдинов И.Х. – научное руководство; развитие методологии; доработка текста; итоговые выводы.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Aindinov, R.R. – data collection and analysis; writing the original text; literature review on the topic; final conclusions.

Sadykov, M.R. – research concept; methodology development; writing the original text; final conclusions.

Gimaltdinov, I.Kh. – scientific guidance; development of methodology; revision of the text; final conclusions.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there is no conflict of interest.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS

There are no human or animal studies in the work.

Информация об авторах

Р.Р. Айндинов – аспирант; AuthorID 1318420.

М.Р. Садыков – кандидат технических наук; AuthorID 1027348.

И.Х. Гималтдинов – кандидат технических наук, доцент; AuthorID 574065.

Information about the author

R.R. Aindinov – postgraduate student; AuthorID 1318420.

M.R. Sadykov – candidate of technical sciences; AuthorID 1027348.

I.Kh. Gimaltdinov – candidate of technical sciences, associate professor; AuthorID 574065.

Статья поступила в редакцию 06.05.2026; одобрена после рецензирования 19.05.2026; принята к публикации 18.06.2026.

The article was submitted 06.05.2026; approved after reviewing 19.05.2026; accepted for publication 18.06.2026.