

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ПРОТОЧНОГО ОСТАЛИВАНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

И. Х. Гималтдинов, М. Р. Садыков, Н. Р. Адигамов, А. В. Гриценко

Реферат. Проведены исследования технологии восстановления шеек коленчатых валов авто-тракторных двигателей методом электролитического проточного осталивания. Разработана лабораторная установка, включающая герметичный корпус, технологическую оснастку, систему циркуляции электролита и питание от выпрямителя ВУ-4270Б. Осаждение металла осуществлялось на катоде – шейке вала, с применением анода из стали 3 по ГОСТ 380–2005. Электролит готовили на основе дистиллированной воды; он содержал FeCl_2 – 250–300 г/л, KCl – 40–50 г/л, H_3BO_3 – 15–30 г/л, NaH_2PO_2 – 15–30 г/л, аскорбиновую кислоту – 0,5–2 г/л. Испытания выполнялись при температуре электролита 30–70°C, силе тока 2–20 А и скорости подачи 10–60 мл/с. Условия: pH = 1, напряжение 3–12 В, выход металла по току 85–96%. Для оценки свойств покрытий использовались твердомер ТКМ-459С, машина трения 77MT-1 и весы AND HR-200. Эксперимент проведён по центрально-композитному плану второго порядка, всего выполнено 17 опытов. Максимальная скорость осаждения металла достигала >1200 мкм/ч (при базовых режимах <700 мкм/ч), износостойкость — 0,021 (Н·м)/мм³, твёрдость — до 59 HRC. Оптимальные параметры установлены при температуре выше 60°C, токе 18 А и подаче электролита 55 мл/с. Построенные регрессионные модели второго порядка показали высокую адекватность: коэффициенты детерминации составили $R^2 = 0,9858$ (скорость осаждения), $R^2 = 0,9006$ (износостойкость), $R^2 = 0,9321$ (твёрдость). Значимость подтверждена критерием Фишера. Полученные зависимости позволяют прогнозировать характеристики покрытий и оптимизировать режимы восстановления шеек коленчатых валов. Разработанная технология рекомендована для внедрения в ремонтные подразделения сельскохозяйственных предприятий, так как обеспечивает увеличение ресурса деталей и снижение затрат.

Ключевые слова: электролитическое проточное осталивание, коленчатый вал, восстановление деталей, износостойкость, твёрдость покрытия, установка, гальваническое осаждение.

Введение. В условиях интенсивного сельскохозяйственного производства особое значение приобретает бесперебойная работа техники. Ключевой задачей при этом становится поддержание работоспособности машин и увеличение их ресурса критически важных узлов [1, 2, 3]. Коленчатые валы автотракторных двигателей – наиболее ответственные и затратные элементы двигателей, от исправности которых зависит функционирование всей системы. Закупка новых деталей такого класса требует серьезных капиталовложений, что приводит к простоям техники и сбоям в производственном цикле [4, 5, 6].

В конструкции автотракторных двигателей коленчатые валы подвергаются высоким динамическим нагрузкам. Статистика отказов свидетельствует, что порядка 30–40% случаев выхода двигателей из строя связаны с различными повреждениями коленчатых валов – от износа шеек до усталостных разрушений. Основными причинами преждевременного износа выступают:

- воздействие знакопеременных нагрузок при изменяющихся режимах работы;
- абразивный износ из-за попадания загрязнений в систему смазки;
- окислительные процессы при эксплуатации (рис. 1).

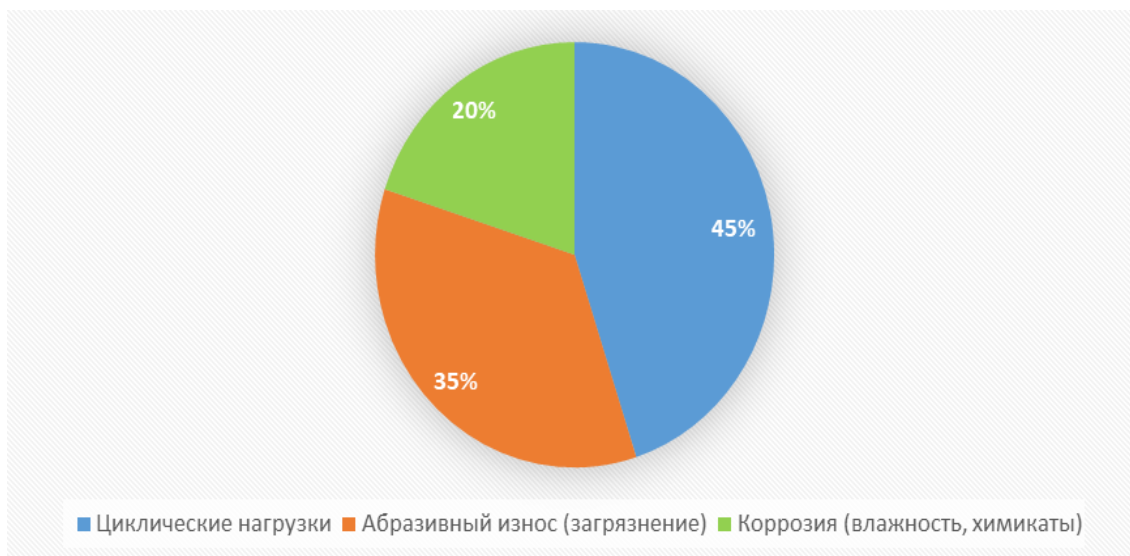


Рис. 1 – Основные причины износа коленчатых валов

На наш взгляд перспективной инновационной технологией восстановления деталей машин является технология проточного остоливания, основанная на электрохимическом осаждении железного покрытия при непрерывной циркуляции электролита. Данный метод обладает рядом существенных преимуществ перед традиционными технологиями: обеспечивает равномерное распределение осаждаемого металла по всей поверхности, позволяет точно контролировать толщину и физико-механические характеристики формируемого покрытия, а также дает возможность проводить локальное восстановление только тех участков детали, которые подверглись износу, что значительно снижает материальные и временные затраты на ремонт [7, 8].

Следовательно, проточное осталивание —

это технологически эффективное и экономически оправданное решение для восстановления коленчатых валов автотракторных двигателей [9].

Цель исследований заключается в повышении эффективности восстановления рабочих поверхностей шеек коленчатых валов автотракторных двигателей путём разработки технологии и технических средств проточного остоливания, обеспечивающих высокую точность обработки, высокую износостойкость и экономическую целесообразность процесса.

Условия, материалы и методы. В лаборатории кафедры «Эксплуатация и ремонт машин» Казанского ГАУ была разработана и собрана установка для нанесения гальванических покрытий на шейки коленчатых валов проточным осталиванием (рис. 2).

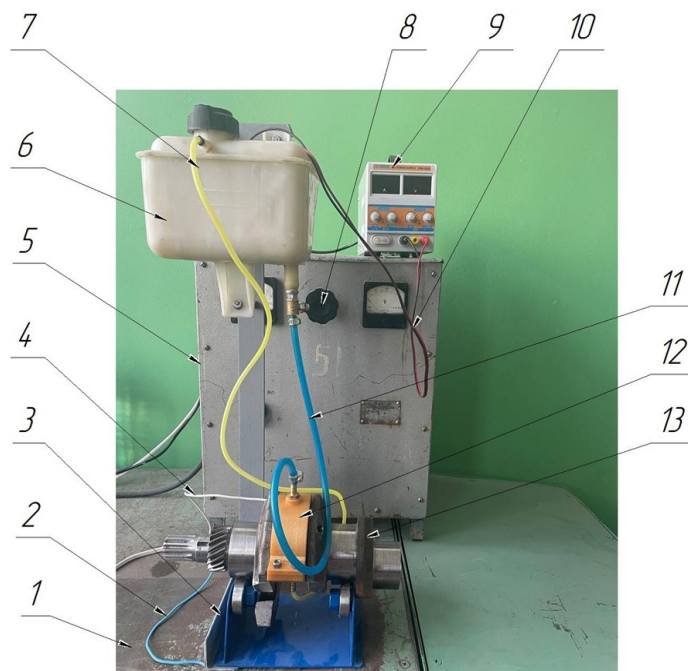


Рис. 2 – Установка для восстановления коленчатых валов местным осталиванием:

- 1 – стол; 2 – кабель катода; 3 – технологическая оснастка устройства; 4 – кабель анода; 5 – выпрямитель тока ВУ – 4270Б; 6 – бак для электролита; 7 – патрубок откачки электролита; 8 – рычаг регулировки силы тока и напряжения; 9 – лабораторный источник питания PSN 305D; 10 – кабель от лабораторного источника питания к насосу; 11 – верхний патрубок

Разработанная установка (рис. 2) предназначена для проточного восстановления изношенных шеек коленчатых валов автотракторных двигателей методом электролитического остоливания. Монтаж установки производится на стационарный рабочий стол, который обеспечивает устойчивое положение установки для проточного остоливания.

Ключевым элементом установки является технологическая оснастка (3), на которой фиксируется восстанавливаемая деталь — коленчатый вал, выступающий в роли катода (13). На участке износа монтируется

герметичный корпус устройства (12), формирующий замкнутую область циркуляции электролита и предотвращающий утечку раствора. Внутри корпуса размещается анод из малоуглеродистой стали, соединённый с выпрямителем постоянного тока через анодный кабель (4), проходящий через изолированный ввод. Катодный провод (2) подключается непосредственно к коленчатому валу.

Подача нового электролита в рабочую зону осуществляется через верхний патрубок (11), а отвод отработанного электролита — через нижний патрубок (7), ведущий в накопительный бак (6), где электролит хранится

регулируется и при необходимости повторно используется.

Электропитание процесса обеспечивается выпрямителем ВУ-4270Б (5), который поддерживает заданный ток и позволяет регулировать его параметры с помощью рычага управления (8). Для создания циркуляции электролита применяется насос, подключённый к лабораторному источнику PSN-305D (9) через кабели (10). Регулируемая скорость подачи раствора позволяет поддерживать оптимальные условия массообмена между анодом и катодом, обеспечивая равномерное осаждение металлического железа на восстанавливаемую поверхность.

Таким образом, установка представляет собой замкнутую электрохимическую систему, способную обеспечить высокоточное и воспроизводимое восстановление цилиндрических поверхностей с необходимым уровнем герметичности и технологической надёжности.

Установка позволяет наносить покрытия методом проточного осталивания на шейки коленчатых валов с высокой точностью и стабильностью процесса. Это делает её надёжным и востребованным средством при восстановлении изношенных рабочих поверхностей машин.

Экспериментальные исследования были направлены на анализ влияния силы тока и скорости подачи электролита на ключевые характеристики покрытий, формируемых методом локального осталивания шеек коленчатых валов. В качестве варьируемых факторов были выбраны:

- X_1 – температура электролита, °C;
- X_2 – сила тока, А;
- X_3 – скорость подачи электролита, мл/с.

В качестве откликов рассматривались следующие показатели:

- Y_1 – твёрдость покрытия (HRC);
- Y_2 – износостойкость ($H \cdot m$)/мм³;
- Y_3 – толщина покрытия (мкм/ч).

Для реализации эксперимента применялся двухфакторный план второго порядка.

В общей сложности было проведено 17 экспериментов, что обеспечило достаточный объем данных для построения достоверных регрессионных моделей, а также для оценки влияния отдельных факторов и их взаимодействий.

В ходе проведения экспериментов был задействован следующий набор приборов и технологического оборудования:

- установка для восстановления коленчатых валов местным осталиванием
- твердомер ТКМ-459С — для измерения твёрдости восстановленных поверхностей;
- машина трения 77MT-1 — для оценки износостойкости нанесённого слоя;
- аналитические весы AND HR-200 — для определения массы осаждённого металла.

Применённое оборудование обеспечивало

требуемую точность измерений и способствовало получению воспроизводимых результатов при варьируемых режимах обработки.

Во время восстановительных операций использовались следующие параметры режима проточного осталивания:

- кислотность электролита — pH = 1;
- сила тока — $I = 2-20$ А;
- напряжение — $U = 3-12$ В;
- скорость подачи электролита — $V = 10-60$ мл/с;
- выход металла по току — $\eta = 85-96\%$;
- температура электролита — $t = 30-70^\circ\text{C}$;
- материал анода — сталь 3 по ГОСТ 380-2005.

Выбор указанных параметров основан на предварительных экспериментальных исследованиях и литературных данных [10], что обеспечивает формирование прочного и равномерного металлического слоя с высокой адгезией к основному материалу.

В качестве электролита использован состав, эффективность применения которого также подтверждена в работе [10]. Он обеспечивает оптимальные условия осаждения металла и формирование покрытия высокого качества. Состав электролита включал следующие компоненты: хлорид железа (FeCl_2): 250–300 г/л; хлорид калия (KCl): 40–50 г/л; борная кислота (H_3BO_3): 15–30 г/л; гипофосфит натрия (NaH_2PO_2): 15–30 г/л; аскорбиновая кислота: 0,5–2 г/л.

Результаты и обсуждение. Построение регрессионных моделей представляет собой ключевой инструмент статистического анализа, позволяющий выявлять взаимосвязи между переменными, прогнозировать значения целевых показателей и оптимизировать технологические процессы.

Основу регрессионного анализа составляет установление математической зависимости между независимыми переменными (факторами) и зависимыми переменными (откликами), что позволяет не только описывать имеющиеся данные, но и предсказывать поведение системы при изменении исходных условий.

Поверхность отклика (рис. 3) демонстрирует, что скорость осаждения металла (δ , мкм/ч) значительно возрастает с увеличением температуры электролита и силы тока, достигая >1200 мкм/ч при 70°C и 20 А.

Выпуклая форма поверхности указывает на квадратичные и взаимодействующие эффекты факторов. Сопоставление экспериментальных точек с расчётными данными регрессионной модели подтверждает её адекватность ($SS = 2339,461$).

Следовательно, для достижения большей скорости осаждения металла целесообразно применять режимы с повышенными значениями температуры и силы тока.

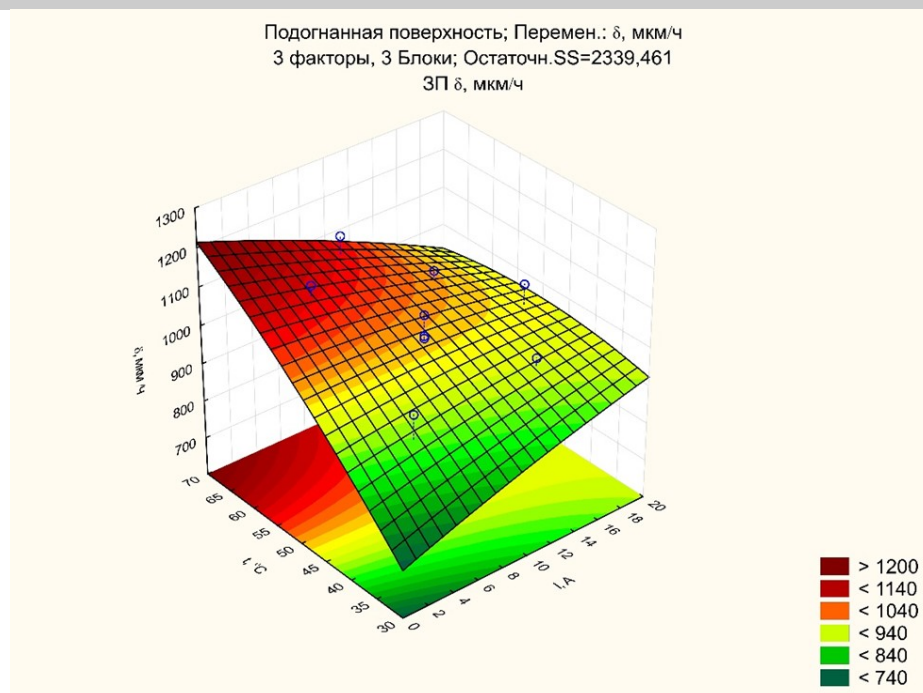


Рис. 3 – Поверхность отклика скорости осаждения металла (δ , мкм/ч) в зависимости от температуры электролита и силы тока

Диаграмма (рис. 4) показывает, что скорость осаждения металла δ (мкм/ч) зависит от скорости подачи электролита и силы тока. Поверхность отклика имеет седловидную форму, отражающую нелинейность и взаимодействие факторов. Максимальная скорость осаждения металла (>1100 мкм/ч)

достигается при силе тока равной 6 А и скорости подачи электролита равной 50 мл/с, тогда как при обратных параметрах наблюдается снижение δ . Это указывает на то, что увеличение тока при умеренной подаче способствует более эффективному осаждению металла.

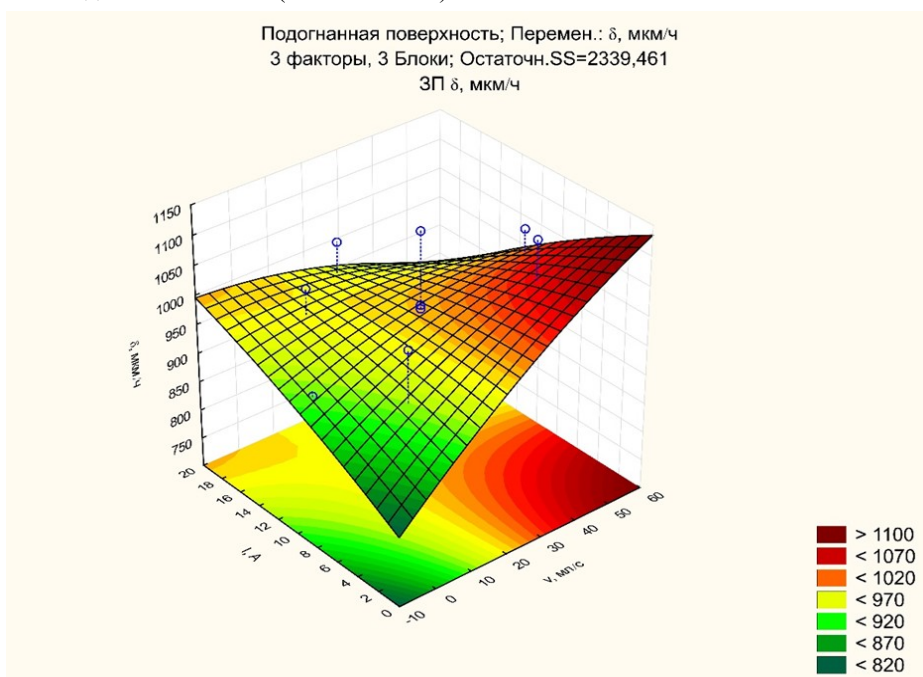


Рис. 4 – Поверхность отклика скорости осаждения металла (δ , мкм/ч) в зависимости от силы тока и скорости подачи электролита

Согласованность экспериментальных данных с поверхностью отклика указывает на адекватность модели (SS = 2339,461).

Таким образом, для достижения

максимальной скорости осаждения металла рекомендуется использовать силу тока 6 А при 50 мл/с скорости подачи электролита.

График (рис. 5) отображает зависимость скорости осаждения металла δ (мкм/ч) от температуры и скорости подачи электролита. Значения δ представлены по оси Z, а цветовая шкала иллюстрирует диапазон от <680 мкм/ч (тёмно-зелёная зона) до >1100 мкм/ч (тёмно-красная зона).

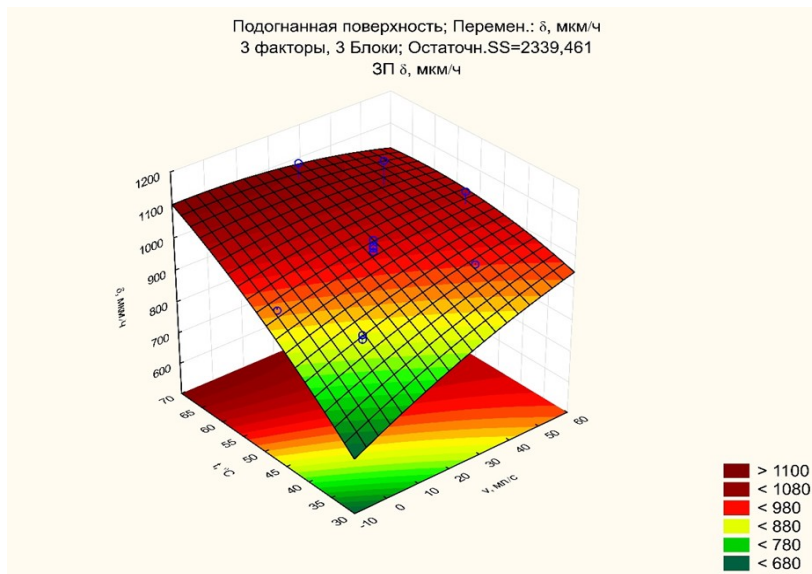


Рис. 5 – Поверхность отклика скорости осаждения металла (δ , мкм/ч) в зависимости от скорости подачи электролита и температуры электролита

Анализ графика показывает, что максимальная скорость осаждения металла достигается при температуре выше 60°C, тогда как минимальные значения (<700 мкм/ч) отмечаются при 30–35°C и 55 мл/с скорости подачи электролита. Это подтверждает значительное влияние температуры и времени контакта электролита с поверхностью на эффективность осаждения. Экспериментальные точки (синие маркеры) хорошо согласуются с моделью, подтверждая её достоверность.

Следовательно, для достижения максимальной скорости осаждения металла рекомендуется поддерживать температуру электролита не ниже 60°C при скорости его

подачи 55 мл/с.

На основе полученных экспериментальных данных разработана математическая модель второго порядка, отражающая зависимость скорости осаждения металла (δ , мкм/ч) от трёх технологических параметров: температуры электролита (t , °C), силы тока (I , А) и скорости подачи электролита (V , мл/с):

$$Y_1 = 391.9889 + 10.0613 \cdot X^1 + 22.2360 \cdot X^2 + 3.5147 \cdot X^3 + 0.0287 \cdot X^{12} + 0.7286 \cdot X^{22} + 0.0272 \cdot X^{32} - 0.6668 \cdot X_1 X_2 - 0.0162 \cdot X_1 X_3 - 0.2223 \cdot X_2 X_3 \quad (1)$$

На графике (рис. 6) представлена зависимость износостойкости покрытия от величины силы тока и скорости подачи электролита.

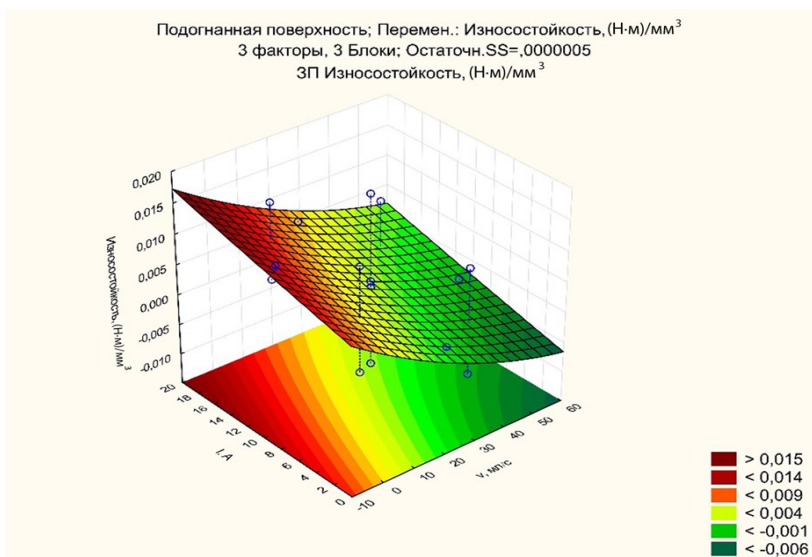


Рис. 6 – Поверхность отклика износостойкости ((H·м)/мм³) в зависимости от силы тока и скорости подачи электролита

Максимальная износостойкость (при минимальном удельном износе $\leq 0,015 \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$) достигается при силе тока 20 А и скорости подачи электролита 10 мл/с. При обратных режимах — низком токе и высокой скорости подачи — наблюдается резкое ухудшение показателя. Согласование экспериментальных точек с поверхностью отклика подтверждает адекватность модели ($\text{SSE} = 5 \times 10^{-7}$) и подчёркивает существенное влияние

технологических параметров на результат. Следовательно, для повышения износостойкости покрытия целесообразно использовать 20 А и 10 мл/с; такие режимы способствуют формированию прочного и стойкого слоя.

График (рис. 7) показывает, что износостойкость $((\text{Н}\cdot\text{м})/\text{мм}^3)$ возрастает при повышении температуры и силы тока, достигая $>0,02 \text{ мм}^2/\text{Н}\cdot\text{м}$ в области их высоких значений.

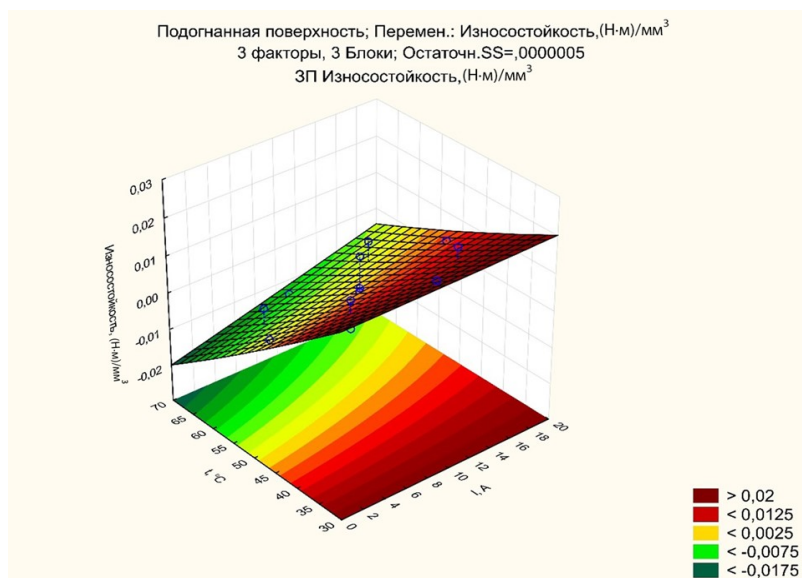


Рис. 7 – Поверхность отклика износостойкости $((\text{Н}\cdot\text{м})/\text{мм}^3)$ в зависимости от силы тока и температуры электролита

Максимальная износостойкость покрытия наблюдается при температуре электролита $\sim 35^\circ\text{C}$ и силе тока 16 А. Регулярный характер поверхности отклика и малая сумма квадратов ошибок аппроксимации ($\text{SSE} = 5 \times 10^{-7}$) подтверждают высокую адекватность модели в пределах исследованного факторного пространства.

Следовательно, повышение температуры и силы тока способствуют увеличению

износостойкости покрытия за счёт более благоприятных условий формирования прочного металлического слоя.

На графике (рис. 8) отображена зависимость износостойкости покрытия $((\text{Н}\cdot\text{м})/\text{мм}^3)$ от температуры электролита и скорости его подачи. Максимальные значения достигаются при температуре 35°C и скорости подачи электролита 50 мл/с.

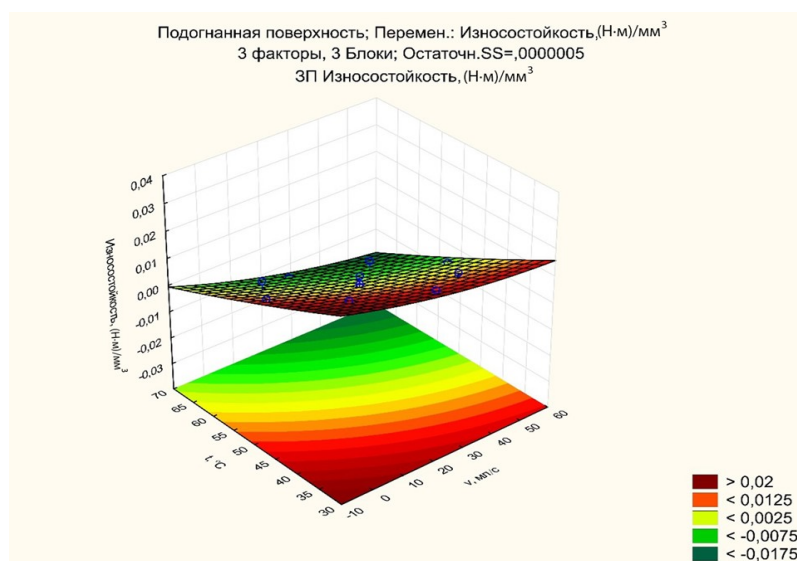


Рис. 8 – Поверхность отклика износостойкости $((\text{Н}\cdot\text{м})/\text{мм}^3)$ в зависимости от температуры и скорости подачи электролита

Поверхность отклика отличается плавностью, а минимальное значение остаточной ошибки ($SS = 0.0000005$) подтверждает высокую точность аппроксимации.

Таким образом, повышение температуры и уменьшение скорости подачи способствуют увеличению износостойкости покрытия благодаря более благоприятным условиям формирования плотного и равномерного слоя.

На основе экспериментальных данных разработана математическая модель второго порядка, отражающая зависимость

износостойкости ($(H \cdot m)/mm^3$) от трёх технологических параметров: температуры электролита ($t, ^\circ C$), силы тока (I, A) и скорости подачи ($V, ml/c$):

$$Y_2 = 0.0272 - 0.0004 \cdot X_1 + 0.0022 \cdot X_2 - 0.0001 \cdot X_3 - 0.0000 \cdot X_1^2 - 0.00007 \cdot X_2^2 + 0.00000 \cdot X_3^2 - 0.00001 \cdot X_1 X_2 - 0.00000 \cdot X_1 X_3 - 0.00001 \cdot X_2 X_3 \quad (2)$$

На графике (рис. 9) представлена поверхность отклика твёрдости покрытия (HRC) в зависимости от силы тока (A) и скорости подачи электролита (мл/с).

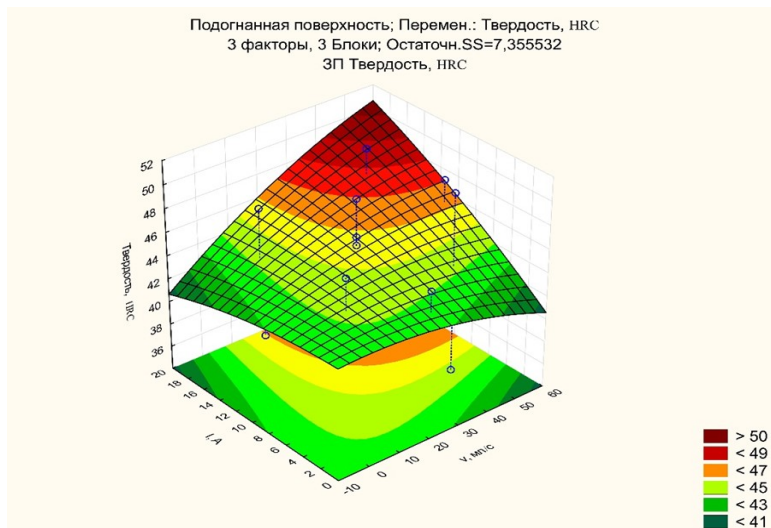


Рис. 9 – Поверхность отклика твёрдости покрытия (HRC) в зависимости от силы тока и скорости подачи электролита

Максимальная твёрдость (>50 HRC) достигается при силе тока равной 20 A и 55 мл/с скорости подачи электролита, минимальная (<41 HRC) — при силе тока равной 2 A и 10 мл/с скорости подачи электролита. Поверхность отклика выражена, экспериментальные точки соответствуют модели, ошибка аппроксимации — 7.36, что подтверждает её приемлемую точность.

Таким образом, для повышения твёрдости

покрытия рекомендуется применять силу тока 20 A и скорость подачи электролита 55 мл/с, способствующие формированию плотной структуры.

График (рис. 10) показывает, что твёрдость покрытия (HRC) возрастает при температуре электролита $65^\circ C$ и силы тока равной 18 A, достигая >55 HRC, а минимальные значения (<31 HRC) отмечаются при 2A и $35^\circ C$.

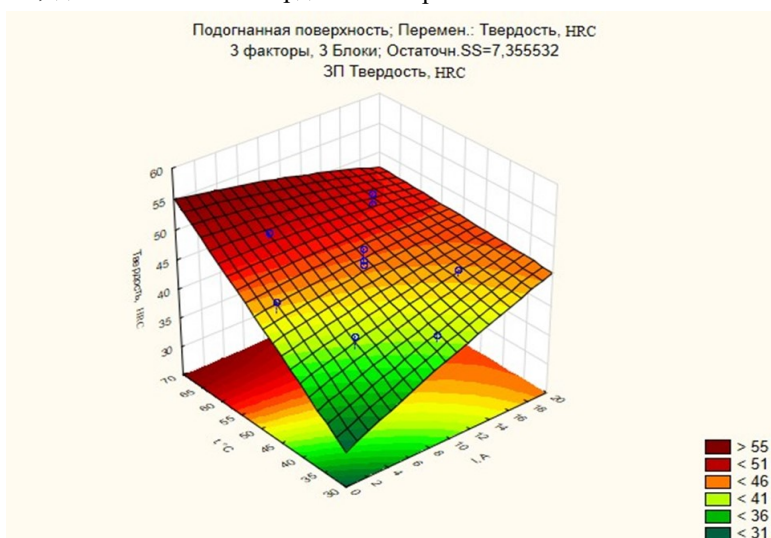


Рис. 10– Поверхность отклика твёрдости покрытия (HRC) в зависимости от температуры электролита и силы тока

Остаточная сумма квадратов равна 7.36, что свидетельствует о достаточной точности модели.

Таким образом, для достижения максимальной твёрдости покрытия рекомендуется применять режимы с температурой электролита 65°C и силы тока 18 А, что обеспечивает интенсивное и качественное осаждение металла.

График (рис. 11) показывает, что максимальная твёрдость покрытия (>55 HRC)

достигается при температуре электролита 70°C и скорости подачи электролита 60 мл/с, а минимальная твердость (<35 HRC) — при противоположных условиях. Поверхность отклика чётко выражена; экспериментальные точки хорошо согласуются с расчётными, а сумма квадратов остатков (SSE = 7,36) свидетельствует об адекватности модели в пределах исследованного диапазона.

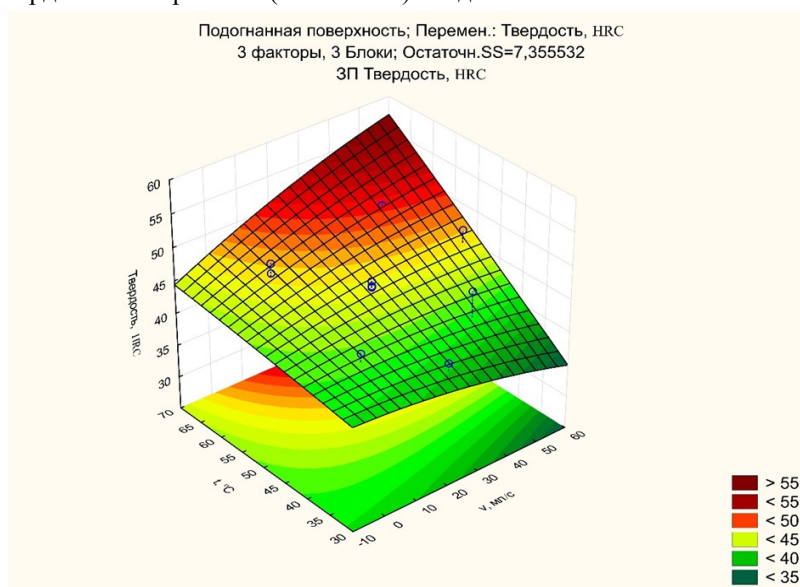


Рис. 11 – Поверхность отклика твёрдости покрытия (HRC) в зависимости от температуры и скорости подачи электролита

На основе экспериментальных данных разработана математическая модель второго порядка, отражающая зависимость твёрдости покрытия (HRC) от трёх технологических параметров: температуры электролита (t , °C), силы тока (I , А) и скорости подачи электролита (V , мл/с):

$$Y_3 = 42.2980 - 0.2850 \cdot X_1 + 1.0428 \cdot X_2 - 0.5847 \cdot X_3 + 0.0056 \cdot X_1^2 - 0.0158 \cdot X_2^2 + 0.0013 \cdot X_3^2 - 0.0151 \cdot X_1 X_2 + 0.0088 \cdot X_1 X_3 + 0.0149 \cdot X_2 X_3 \quad (3)$$

Проведённый регрессионный анализ позволил выявить устойчивые математические зависимости между технологическими параметрами процесса — температурой электролита,

силой тока и скоростью подачи — и ключевыми характеристиками восстановленного покрытия: толщиной, износостойкостью и твёрдостью. Построенные модели второго порядка обладают высокой степенью достоверности, что позволяет не только точно описывать экспериментальные данные, но и прогнозировать оптимальные режимы обработки. Установлено, что максимальные значения всех трёх показателей достигаются при температуре электролита 65°C и силы тока 18 А в сочетании со скоростью подачи электролита 55 мл/с.

Результаты оценки регрессионных моделей по критерию Фишера и коэффициенту детерминации R^2 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Статистическая оценка значимости регрессионных моделей по критерию Фишера и коэффициенту детерминации R^2

Модель	R^2	F-факт.	F-крит. (0.05)	$F > F_{\text{крит}}$
Твёрдость покрытия (HRC)	0.9321	3.85	3.68	Да
Износостойкость (мм ² /Н·м)	0.9006	7.04	3.68	Да
Скорость осаждения металла (мкм/ч)	0.9858	3.68	2.85	Да

Все три регрессионные модели статистически значимы по критерию Фишера: $F_{\text{факт}} > F_{\text{кр}}$ при $\alpha = 0,05$ (твёрдость: $3,85 > 3,68$; износостойкость: $7,04 > 3,68$; скорость осаждения: $3,68 > 2,85$). Значения $R^2 = 0,9006-0,9858$ указывают на высокую долю объяснённой вариации. Модели могут использоваться для анализа, прогнозирования

и оптимизации в пределах исследованного диапазона факторов.

Результаты дисперсионного анализа подтвердили, что температура электролита оказывает наибольшее влияние на скорость осаждения металла, силу тока и расход электролита — на износостойкость, а ключевым фактором для твёрдости является сила тока.

Выводы. Сформулированные по итогам проведённых исследований выводы подтверждают достижение поставленной цели — повышения эффективности восстановления шеек коленчатых валов автотракторных двигателей методом электролитического проточного осталивания. Разработанная установка, собранная в лаборатории кафедры «Эксплуатация и ремонт машин» Казанского ГАУ, позволила реализовать восстановительный процесс в условиях локального воздействия, обеспечив стабильность, высокую точность и технологическую воспроизводимость параметров.

В результате экспериментальных исследований были получены регрессионные модели второго порядка, описывающие зависимости между технологическими параметрами процесса (температура электролита, сила тока, скорость подачи) и основными характеристиками восстановленного слоя — скоростью осаждения металла, твёрдостью и износостойкостью. Для твёрдости покрытия коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,9321$, для износостойкости — $R^2 = 0,9006$, что указывает на высокую точность моделей. Модель скорости осаждения металла по-крытия ($R^2 = 0,9858$), несмотря на высокую аппроксимацию, требует дополнительной корректировки по критерию Фишера.

Максимальные значения скорости осаждения металла достигали более 1200 мкм/ч, что в 1,8 раза выше, чем при базовых параметрах (около 680 мкм/ч).

Износостойкость покрытия достигала 0,021 (Н·м)/мм³, а твёрдость — до 59 HRC, что на 25–30% выше по сравнению с исходными режимами. Наилучшие результаты были получены при температуре электролита 60–70°C, силе тока 15–20 А и скорости подачи 7–10 мл/с. Такие режимы обеспечивали оптимальные условия формирования плотного, равномерного и прочного покрытия с высокой адгезией.

Проведённый дисперсионный анализ показал, что наибольшее влияние на толщину по-крытия оказывает температура, на износостойкость — сила тока и скорость подачи, а на твёрдость — преимущественно сила тока. Это позволяет с высокой точностью регулировать выходные параметры восстановленного слоя за счёт управления входными факторами.

В перспективе возможно развитие автоматизированных систем управления процессом проточного осталивания с применением сенсоров и цифровых контроллеров, а также адаптация метода к восстановлению деталей из других материалов и узлов различной геометрии.

Сведения о финансировании. Работа выполнена при поддержке гранта (№143/2024 – ПД от 16.12.2024 г.) молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан.

Литература

1. Оценка продовольственной безопасности России / И. Н. Сафиуллин, Б. Г. Зиганшин, Э. Ф. Амирова и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16. № 2(62). С. 124–132. – doi 10.12737/2073-0462-2021-124-132.
2. Зиганшин Б. Г., Клычова Г. С., Закирова А. Р. Основные направления формирования механизма социального развития сельскохозяйственного предприятия // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2019. Т. 14. № 3(54). С. 155–161. doi 10.12737/article_5db98dd5ab2ea1.73901024.
3. Development of agriculture based on geographic information technologies / D. A. Mustashkina, M. M. Khananov, M. N. Kalimullin, N. V. Karpova // E3S Web of Conferences. 2022. Vol. 282. P. 07019. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2021/58/e3sconf_efsc2021_07019/e3sconf_efsc2021_07019.html
4. Хафизов К. А. Снижение суммарных энергетических затрат на технологических операциях в АПК — путь снижения выбросов парниковых газов в атмосферу // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16. № 3(63). С. 43–47. – doi 10.12737/2073-0462-2021-43-47.
5. Хафизов К. А., Халиуллин Ф. Х. Пути повышения эффективности использования машинно-тракторных агрегатов // Техника и оборудование для села. 2015. № 10. С. 20–22.
6. Влияние уровня эксплуатации тракторов в сельскохозяйственном производстве на показатели их надежности / Галиев И. Г., Хусаинов Р. К., Хусаинова Т. А. и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2018. Т. 13. № 3(50). С. 77–80. – doi 10.12737/article_5bcf57af5d83b6.20549781.
7. A method for calculating the parameters of a unit for thermoradiation treatment of polymer coatings in the restoration of car body parts / Li R. I., Rizaeva Y. N., Bykonya A. N. et al. // Polymer Science, Series D. 2021. Vol. 14. No. 4. P. 517–521. – doi 10.1134/S1995421221040110.
8. Теоретические аспекты терморadiационного нагрева изношенных корпусных деталей техники при восстановлении / Ли Р. И., Псарев Д. Н., Быконова А. Н. и др. // Наука в центральной России. 2020. № 1(43). С. 50–59. – doi 10.35887/2305-2538-2020-1-50-59.
9. Theory and Practice of Substantiation of Electroplating Modes by Electrolytic Rubbing / Sadykov M., Gimaltinov I., Adigamov N. et al. // AIP Conference Proceedings. 2024. Vol. 3154. P. 20054. – doi: 10.1063/5.0197166.
10. Садыков, М. Р. Разработка технологии и технических средств повышения эффективности восстановления деталей машин электролитическим натиранием: диссертация ... кандидата технических наук: 4.3.1. / Садыков Марат Рашитович; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Чувашский государственный аграрный университет»; Диссовет 99.2.103.03 (99.2.103.03)]. – Казань, 2025. – 175 с.: ил. – (Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса). – Шифр хранения: OD 61 25-5/1195.

Сведения об авторах:

Гималдинов Ильдус Хафизович – кандидат технических наук, врио заведующего кафедрой эксплуатации и ремонта машин, e-mail: tskazgau@mail.ru

Садыков Марат Рашитович – ассистент кафедры эксплуатации и ремонта машин, e-mail: marat3012@yandex.ru

Адигамов Наиль Рашитович – доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации и ремонта машин, e-mail: n-adigamov@rambler.ru

Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия.

Гриценко Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор Передовой инженерной школы двигателестроения и специальной техники «Сердце Урала»¹; профессор кафедры технического сервиса машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности²; e-mail: alexgrits13@mail.ru

¹Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

²Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Россия.

STUDYING PARAMETERS OF ELECTROLYTIC FLOW TINNING FOR CRANKSHAFT RESTORATION

I. Kh. Gimaltdinov, M. R. Sadykov, N. R. Adigamov, A. V. Gritsenko

Abstract. This study was conducted on the technology for restoring automotive and tractor engine crankshaft journals using electrolytic flow tinning. A laboratory setup was developed, including a sealed housing, process equipment, an electrolyte circulation system and power supply from a VU-4270B rectifier. Metal deposition was carried out at the cathode – the journal using an anode made of grade 3 steel according to GOST 380-2005. The electrolyte was prepared with distilled water; it contained FeCl₂ – 250-300 g/l, KCl – 40-50 g/l, H₃BO₃ – 15-30 g/l, NaH₂PO₂ – 15-30 g/l, ascorbic acid – 0.5-2 g/l. The tests were carried out at an electrolyte temperature of 30-70°C, a current of 2-20 A and a feed rate of 10-60 ml/s. Conditions: pH = 1, voltage 3-12 V, metal current efficiency 85-96%. Coating properties were evaluated using TKM-459C hardness tester, 77MT-1 friction machine and AND HR-200 scale were used. The experiment was carried out according to a second-order central-composite design, a total of 17 tests were performed. The maximum metal deposition rate reached >1200 µm/h (under base conditions <700 µm/h), wear resistance was 0.021 (N m)/mm³ and hardness was up to 59 HRC. Optimum parameters were established at temperatures above 60°C, a current of 18 A, and an electrolyte flow rate of 55 ml/s. The constructed second-order regression models demonstrated high adequacy: the determination coefficients were R² = 0.9858 (deposition rate), R² = 0.9006 (wear resistance), and R² = 0.9321 (hardness). Significance was confirmed by Fisher criterion. The obtained dependencies make it possible to predict coating characteristics and optimize crankshaft journal restoration modes. The developed technology is recommended for implementation in repair departments of agricultural enterprises, as it ensures an increase in the service life of components and a reduction in costs.

Key words: electrolytic flow tinning, crankshaft, restoration of parts, wear resistance, coating hardness, installation, galvanic deposition.

References

1. Safiullin IN, Ziganshin BG, Amirova EF. [Assessment of food security in Russia]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021; Vol.16. 2(62). 124-132 p. – doi 10.12737/2073-0462-2021-124-132.
2. Ziganshin BG, Klychova GS, Zakirova AR. [Main directions for the formation of a mechanism for social development of an agricultural enterprise]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2019; Vol.14. 3(54). 155-161 p. doi 10.12737/article_5db98dd5ab2ea1.73901024.
3. Mustashkina DA, Khannanov MM, Kalimullin MN, Karpova NV. Development of agriculture based on geographic information technologies. E3S Web of Conferences. 2022; Vol.282. 07019 p. Available from: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2021/58/e3sconf_efsc2021_07019/e3sconf_efsc2021_07019.html
4. Khafizov KA. [Reducing total energy costs in technological operations in the agro-industrial complex - a way to reduce greenhouse gas emissions into the atmosphere]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021; Vol.16. 3(63). 43-47 p. – doi 10.12737/2073-0462-2021-43-47.
5. Khafizov KA, Khaliullin FK. [Ways to improve the efficiency of using machine-tractor units]. Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2015; 10. 20-22 p.
6. Galiev IG, Khusainov RK, Khusainova TA. [The influence of tractors operation level in agricultural production on their reliability indicators]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2018; Vol.13. 3(50). 77-80 p. – doi 10.12737/article_5bcf57af5d83b6.20549781.
7. Li RI, Rizaeva YN, Bykonya AN. A method for calculating the parameters of a unit for thermoradiation treatment of polymer coatings in the restoration of car body parts. Polymer Science, Series D. 2021; Vol.14. No.4. 517-521 p. – doi 10.1134/S1995421221040110.
8. Li RI, Psarev DN, Bykonya AN. [Theoretical aspects of thermoradiation heating of worn frame parts of equipment during restoration]. Nauka v tsentralnoy Rossii. 2020; 1(43). 50-59 p. – doi 10.35887/2305-2538-2020-1-50-59.
9. Sadykov M, Gimaltdinov I, Adigamov N. Theory and practice of substantiation of electroplating modes by electrolytic rubbing. AIP Conference Proceedings. 2024; Vol.3154. 20054 p. – doi: 10.1063/5.0197166.
10. Sadykov MR. [Development of technology and technical means to improve the efficiency of restoration of machine parts by electrolytic rubbing: dissertation for a degree of Ph.D. of Technical sciences: 4.3.1]. Mesto zashchity: FGBOU VO “Chuvashskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet”; Dissovet 99.2.103.03 (99.2.103.03). Kazan. 2025; 175 p. illustrated. Tekhnologii, mashiny i oborudovanie dlya agropromyshlennogo kompleksa. Shifr khraneniya: OD 61 25-5/1195.

Authors:

Gimaltdinov Ildus Khafizovich – Ph.D. of Technical Sciences, Acting head of Machine Operation and Repair Department, e-mail: tskazgau@mail.ru

Sadykov Marat Rashitovich – assistant of Machine Operation and Repair Department, e-mail: marat3012@yandex.ru

Adigamov Nail Rashitovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Machine Operation and Repair Department, e-mail: n-adigamov@rambler.ru

Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.

Gritsenko Aleksandr Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Advanced Engineering School of Engine Building and Specialized Equipment “Heart of the Urals”¹; Professor of Department of Technical Service of Machines, Equipment, and Life Safety²; e-mail: alexgrits13@mail.ru

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

²South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia.