

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГИДРОАППАРАТУРЫ ЖЕЛЕЗНЕНИЕМ В ПОТОКЕ ЭЛЕКТРОЛИТА

INTENSIFICATION OF THE RECOVERY OF HYDRAULIC EQUIPMENT PARTS BY IRON IN THE ELECTROLYTE FLOW

Ю.Е. КИСЕЛЬ, д.т.н.
С.П. СИМОХИН
С.А. МУРАЧЕВ

ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», Брянск, Россия,
Simonin77@mail.ru

YU.E. KISEL', Dsc in Engineering
S.P. SIMOKHIN,
S.A. MURACHEV

Bryansk State Engineering and Technological University,
Bryansk, Russia, Simonin77@mail.ru

Предложена технология безваннового железнения деталей в потоке электролита с одновременным гидромеханическим активированием наращиваемой поверхности, показаны ее преимущества перед традиционным видом нанесения покрытий. Изучены структура, некоторые физико-механические и эксплуатационные свойства железных покрытий в зависимости от режимов электролиза и состава электролитов. Показана возможность высокоскоростного электроосаждения железа с широким спектром физико-механических свойств. Установлены режимы электролиза, позволяющие получать качественные прочносцепленные «чистые» железные покрытия с износостойкостью, в несколько раз превышающей закаленные легированные стали, и скоростью роста осадков, в десятки раз большей, чем при традиционном железнении. Разработан типовой технологический процесс железнения деталей, который апробирован на примере восстановления золотников гидрораспределителей сельскохозяйственных машин. Предложены конструкции установки и электрохимической ячейки для железнения золотников гидрораспределителей, обеспечивающие оптимальные гидродинамические условия при нанесении покрытий на изношенные поверхности. Приведены рекомендации по постэлектролизной обработке восстановленных деталей железнением. Выполнены стендовые и полевые испытания гидрораспределителей с восстановленными золотниками, которые подтвердили результаты лабораторных исследований и показали, что за период эксплуатации неисправностей выявлено не было. Техничко-экономические расчеты показали высокую эффективность предлагаемой технологии в сравнении с традиционным железнением. Внедрение технологии на производстве позволит сократить производственные площади и затраты времени на восстановление деталей за счет увеличения производительности процесса железнения и сокращения числа операций, уменьшит затраты материалов для приготовления электролитов за счет сокращения операции анодной обработки и промывок, повысит надежность технологии за счет улучшения ее структурной схемы.

Ключевые слова: прочность сцепления, микротвердость, износостойкость, технологический процесс, ячейка.

Для цитирования: Кисель Ю.Е., Симохин С.П., Мурачев С.А. Интенсификация восстановления деталей гидроаппаратуры железнением в потоке электролита // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 4. С. 63–70. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-63-70.

The technology of bath-free ironing of parts in an electrolyte flow with simultaneous hydromechanical activation of the growing surface is proposed. Its advantages over the traditional type of coating are introduced. The structure, some physicochemical and operational properties of iron coatings were studied depending on the electrolysis regimes and the composition of electrolytes. The possibility of high-speed electrodeposition of iron with a wide range of physical and mechanical properties is shown. There were shown the electrolysis modes, which make it possible to obtain high-quality strong-adhered pure-iron coatings with a wear resistance several times higher than hardened alloy steels and a precipitation growth rate tens of times higher than with traditional ironing. A typical technological process of parts ironing was developed. It was tested on the example of restoration of hydraulic valve spools of agricultural machinery. The design of an installation and an electrochemical cell for ironing the valve hydraulic distributors, providing optimal hydrodynamic conditions when applying coatings to worn surfaces, was proposed. Recommendations for the post-electrolysis treatment of restored parts by iron are given. Bench and field tests of hydraulic valves with remanufactured valves were carried out. They confirmed the results of laboratory studies, and showed that no malfunctions were identified during the operation period. Technical and economic calculations have shown the high efficiency of the proposed technology in comparison with traditional ironing. The introduction of the technology in production will reduce the production area and the time spent on restoring parts by increasing the productivity of the iron process and reducing the number of operations, reducing the cost of materials for preparing electrolytes by reducing the operation of anodic treatment and washing, and increasing the reliability of the technology by improving its structural scheme.

Keywords: adhesion strength, microhardness, wear resistance, technological process, cell.

Cite as: Kisel' YU.E., Simokhin S.P., Murachev S.A. Intensification of the recovery of hydraulic equipment parts by iron in the electrolyte flow. Traktory i sel'khoz mashiny. 2021. No 4, pp. 63–70 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-63-70.

Введение

Для интенсификации электролитического железнения, расширения номенклатуры восстанавливаемых деталей сельскохозяйственной техники и одновременного упрощения технологического процесса наращивания металла разработан безваннный метод нанесения покрытий в проточном электролите [1–5]. При помощи приспособлений детали помещают в электрохимическую ячейку, или их поверхность, подлежащая нанесению покрытий, превращается в закрытую гальваническую ванну. Вместо погружения всей детали в электролит рабочий раствор подается насосом к месту нанесения покрытий. В этом случае отпадает необходимость применять ванны больших размеров, изолировать поверхности, не подлежащие покрытию, применять подвесные устройства.

Нанесение железных осадков в потоке электролита с одновременным гидромеханическим активированием наращиваемой поверхности (за счет воздействия скоростных гетерофазных потоков с грубодисперсными твердыми частицами) позволяет значительно повысить производительность процесса. При железнении таким способом с увеличением интенсивности перемешивания величина диффузионного пограничного слоя уменьшается, а количество диффундирующего вещества (ионов железа) возрастает. Поэтому повышается возможность без ущерба для электрохимического процесса увеличить плотность тока и получать плотные осадки с хорошими механическими и эксплуатационными свойствами. Однако сведения об их физико-механических свойствах ограничены. Не установлено, какие режимы нанесения и состав электролита-суспензии (содержание частиц дисперсной фазы в электролите) обеспечивает высокую износостойкость покрытий в условиях абразивного изнашивания. Для разработки технологического процесса получения гальванических покрытий необходимо выбрать оптимальные условия получения наиболее износостойкой матрицы.

Цель исследований

Разработка технологии восстановления деталей безванновым способом в потоке электролита.

Материалы и методы

Влияние добавок и параметров электролиза на прочность сцепления покрытий проводили

с применением центрального ротатбельного униформ – планирования второго порядка при $k = 3$. Обработку результатов эксперимента проводили по стандартной методике [6, 7].

Покрытия получали из хлористого электролита-суспензии (ЭС) железнения ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – 500 ± 10 кг/м³) при режимах электролиза: pH – $0,5 \pm 0,1$; температура ЭС (Т) – 40 ± 2 °С; скорость потока электролита (v) – $1 \dots 9$ м/с; содержание частиц электрокорунда белого в ЭС (марки F100) – $0 \dots 150$ г/л; катодная плотность тока (D_k) – $100 \dots 500$ А/дм². После нанесения покрытия образцы нейтрализовали и стабилизировали в течении 10 суток.

Установка для нанесения покрытия на образцы включала электролизеры, источник тока, термостат, приборы для регулирования и контроля параметров электролиза (рис. 1).

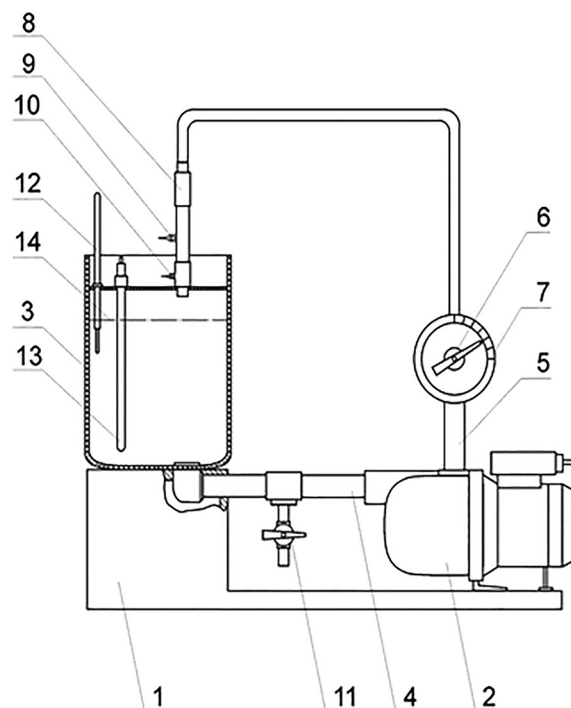


Рис. 1. Экспериментальная установка для нанесения покрытий на образцы:

1 – основание; 2 – мотор-насос; 3 – ванна (0,01 м³); 4 – всасывающий трубопровод; 5 – подающий трубопровод; 6 – кран регулировочный; 7 – диск со шкалой; 8 – ячейка; 9 – клемма питания анода; 10 – клемма питания катода; 11 – кран сливной; 12 – термометр; 13 – контактный нагреватель; 14 – уровень электролита

Fig. 1. Experimental setup for coating samples:
1 – base; 2 – motor pump; 3 – bath (0,01 m³); 4 – intake pipeline; 5 – supply pipeline; 6 – control valve; 7 – disc with a scale; 8 – cell; 9 – anode supply terminal; 10 – cathode supply terminal; 11 – drain valve; 12 – thermometer; 13 – contact heater; 14 – electrolyte level

Источником тока служили выпрямители типа ВСА-50. Раствор в ванне железнения (объемом 15 литров) подогревался и стабилизировался по температуре с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$ с помощью термостата. Кислотность электролита контролировали ионометром ЭВ-74.

Прочность сцепления определяли методом кольцевого сдвига [8, 9] на цилиндрических образцах из стали 35 (длина 60 мм, диаметр 12 мм, толщина покрытия $0,5 \pm 0,1$ мм), которые получали в электрохимической ячейке (рис. 2).

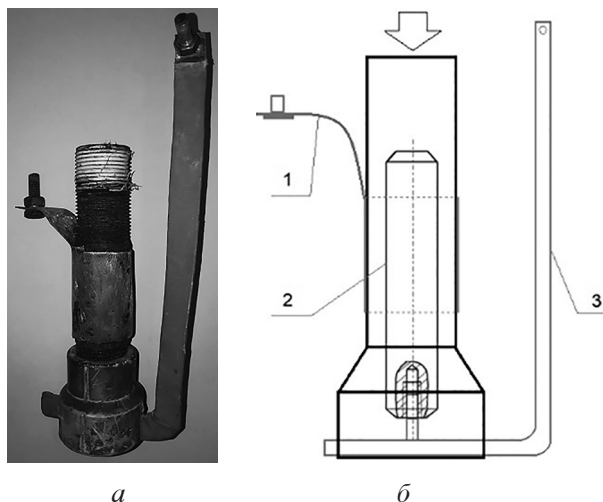


Рис. 2. Ячейка для нанесения осадков на образцы при исследовании их прочности сцепления с основой:

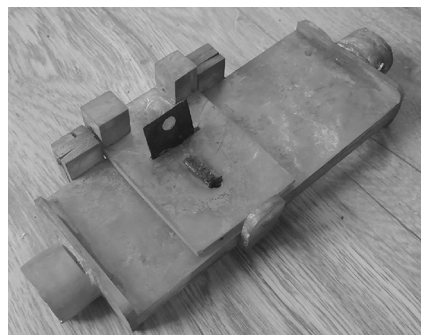
а) общий вид ячейки; б) схема ячейки:

1 – анод; 2 – образец; 3 – катод

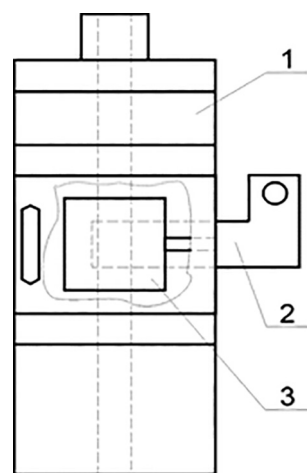
Fig. 2. Cell for depositing precipitates on samples in the study of their adhesion strength to the base:

а) general view of the cell; б) cell diagram:

1 – anode; 2 – sample; 3 – cathode



а



б

Рис. 3. Ячейка для нанесения покрытий на образцы при исследовании их износостойкости:

1 – корпус; 2 – электрод; 3 – образец

Fig. 3. Cell for applying coatings to samples in the study of their wear resistance:

1 – body; 2 – electrode; 3 – sample

Исследования покрытий на абразивное изнашивание проводились в соответствии с ГОСТ 23.208–79. Электрохимические покрытия толщиной 0,3...0,5 мм наносили на пластины из стали 35 с размерами 30×30×1 мм в электрохимической ячейке (рис. 3). Время испытаний образцов определялось необходимостью получения ощутимой величины износа (J , мг), который определяли весовым методом с погрешностью $5 \cdot 10^{-8}$ кг. В качестве абразивного материала использовали речной песок, с размером зерен не более 1 мм. Эталоны сравнения служили образцы из сталей: 65Г закаленная и 35.

Микроструктуру изучали на поперечных шлифах образцов после механических испытаний с помощью микроскопов МИМ-8. Микротвердость (H_μ) измеряли на ПМТ-3М по ГОСТ 9450–76.

Повторность испытаний в опытах составляла от 3 до 20. Опытные данные обрабатывали методами математической статистики. Для построения функциональных зависимостей использовали регрессионный анализ [6].

Результаты и обсуждение

Исследования показали, что микротвердость, прочность сцепления с основой и износостойкость покрытий, зависела от параметров электролиза. При регрессионном анализе трехфакторного эксперимента были получены эмпирические зависимости прочности сцепления и износа покрытий от параметров процесса электролиза (скорость потока электроли-

та – X_1 ; плотность тока, А/дм², X_2 ; содержание частиц – X_3):

$$\sigma_{\text{сш}} = 219,1 + X_1 + 17,3 \cdot X_2 - 18,6 \cdot X_3 + 2,3 \cdot X_1^2 + 1,2 \cdot X_2^2 + 0,3 \cdot X_3^2 + 3,0 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,3 \cdot X_1 \cdot X_3 + 1,3 \cdot X_2 \cdot X_3; \quad (1)$$

$$J = 10,6 - 1,5 \cdot X_1 - 2,5 \cdot X_2 + 0,9 \cdot X_3 + 1,9 \cdot X_1^2 + 0,5 \cdot X_2^2 + 0,6 \cdot X_3^2 + 2,9 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,8 \cdot X_1 \cdot X_3 - 6,0 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (2)$$

Анализ результатов исследований показал, что наибольшее влияние на прочность сцепления и износостойкость покрытий оказывала плотность катодного тока (рис. 4).

Это влияние наиболее заметно при изучении свойств осадков, полученных при режимах электролиза, соответствующих «звездным» точкам плана эксперимента. Увеличение катодной плотности тока приводило к снижению прочности сцепления с 240...250 до 120...150 МПа и увеличению износа покрытий (рис. 4). Осадки, полученные при высоких плотностях тока из скоростного потока и низком содержании частиц, имели наименьшую прочность сцепления (140...150 МПа) и износостойкость, которые обусловлены их низким качеством и высокими внутренними напряжениями (рис. 5). Их структура характеризовалась сеткой сквозных трещин, разделяющих осадок на крупные блоки. Это может быть результатом действия интенсивно выделяющегося во-

дорода и накопившихся в прикатодной зоне чужеродных частиц, которые гидроабразивный поток не в полной мере удалял с поверхности катода. Хотя покрытия имели высокую микротвердость (рис. 5), они не обладали высокой износостойкостью, поскольку при их деформировании в процессе нагружения происходит развитие готовых очагов разрушения.

Увеличение содержания частиц электрокорунда в электролите приводило к увеличению прочности сцепления и износостойкости покрытий (см. рис. 4). Введение в электролит абразивных частиц способствовало получению монолитных осадков или структуры с мелкой сеткой микротрещин. Вероятно, это обусловлено повышением эффективности перемешивания прикатодного слоя и снижения перенапряжения при выделении осадка на катоде, очисткой поверхности катода от выделяющегося водорода и чужеродных частиц.

Можно отметить, что структура электролитического железа, полученного в условиях гидромеханического активирования с увеличением скорости потока электролита-суспензии более 3...4 м/с при постоянных остальных условиях электролиза, отличалась отсутствием обычной слоистости, наблюдаемой у покрытий, получаемых при стационарных условиях электролиза. Таким образом, нестационарные режимы электроосаждения, обеспечивающие получение осадков с микротвердостью выше 3,5...4,0 ГПа, являются границей раздела области получения трещиноватых разупрочненных покрытий.

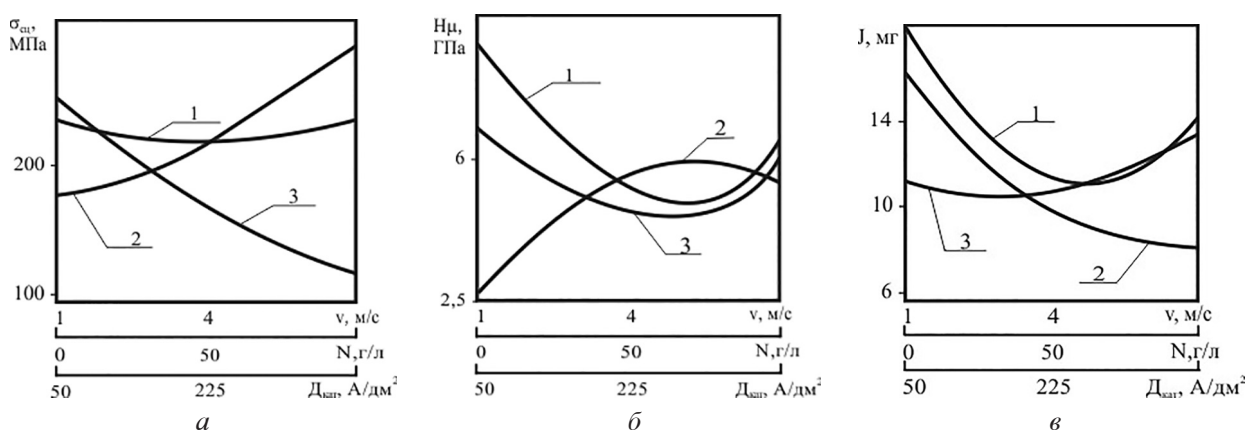


Рис. 4. Влияние параметров электролиза на прочность сцепления покрытия с основой (а), микротвердость (б) и износ (в):

- 1 – скорость потока электролита-суспензии; 2 – содержание дисперсных частиц;
3 – катодная плотность тока

Fig. 4. Influence of electrolysis parameters on the adhesion strength of the coating to the base (a), microhardness (b) and wear (c): 1 – flow rate of the electrolyte-dispersion; 2 – content of dispersed particles; 3 – cathode current density

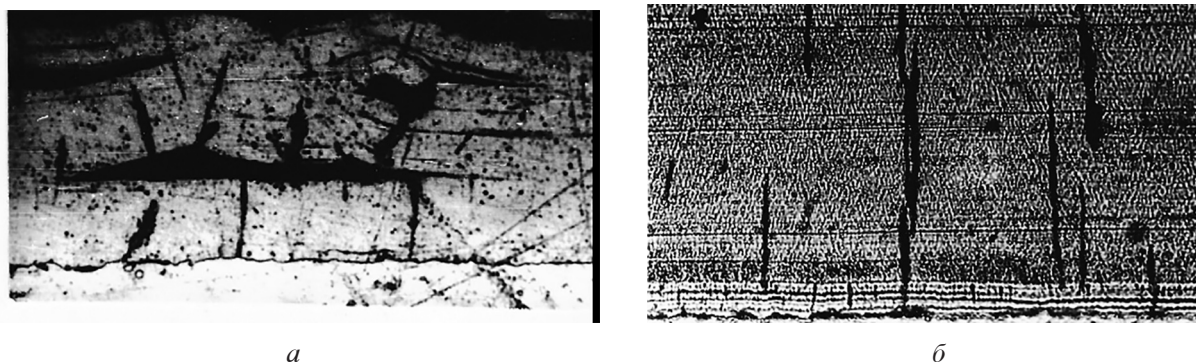


Рис. 5. Влияние условий электролиза на микроструктуру электроосажденного железа ($\times 400$):
а) разрушенные разупрочненные осадки; б) монолитные осадки

Fig. 5. The influence of electrolysis conditions on the microstructure of electrodeposited iron ($\times 400$):
a) destroyed softened deposits; b) monolithic sediments

Увеличение содержания наполнителя в ЭС до 80...120 кг/м³ приводило к формированию структуры покрытий с густой сеткой микротрещин (рис. 6), что способствовало увеличению износостойкости покрытий и прочности сцепления их с основой до 260...280 МПа.

При изломе покрытия не отделялись от подложки (рис. 6). Подобное изменение механических свойств покрытия можно попытаться объяснить изменением их внутренних напряжений растяжения, которые с увеличением микропористости покрытий частично «снимаются» [5]. Такая структура, обладая низким уровнем остаточных внутренних напряжений, вследствие более глубокого разрушения покрытий в процессе электролиза, приводила к увеличению микротвердости и износостойкости осадков.

Таким образом, для получения прочносцепленных и износостойких покрытий, имеющих высокую микротвердость (4...5 ГПа), оптимальную микроструктуру и высокую скорость роста осадков (1,5...3 мм/ч), необходимо поддерживать наиболее благоприятные состав и режимы электролиза: скорость потока ЭС – 3...4 м/с, содержание частиц в ЭС – 80...120 г/л, D_k – 150...300 А/дм². Соблюдение рекомендуемых режимов электролиза позволяет получать покрытия с износостойкостью в 1,5...2 раз большей по сравнению со сталью 65Г закаленной (серийного лемеха) и в 3...5 раз чем со сталью 35 нормализованной.

Результаты лабораторных исследований были использованы для разработки технологии восстановления деталей сельскохозяйственных машин в потоке электролита,

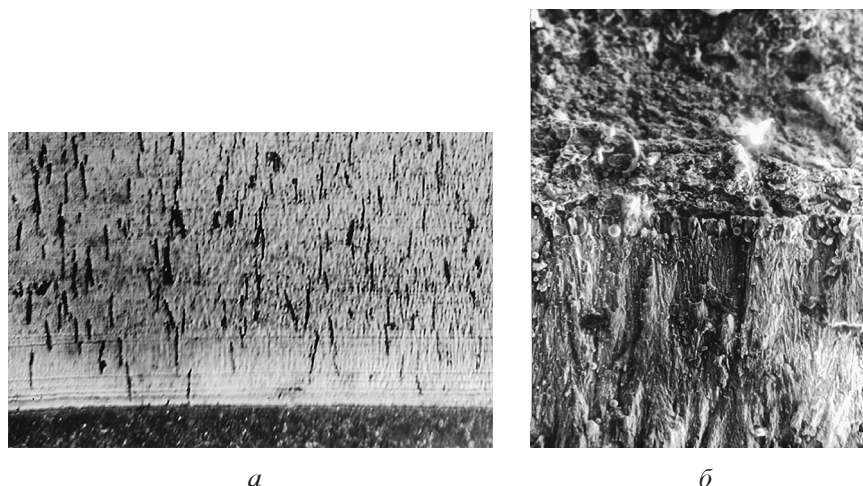


Рис. 6. Микроструктура ($\times 400$) (а) и структура поперечного излома осадков железа ($\times 1000$) (б), полученных при оптимальных условиях электролиза

Fig. 6. Microstructure ($\times 400$) (a) and structure of transverse fracture of iron deposits ($\times 1000$) (b), obtained under optimal electrolysis conditions

апробацию которого выполняли на примере золотников гидрораспределителей.

В результате исследований процесса электроосаждения железа в условиях гидромеханического активирования катода была установлена возможность высокоскоростного электроосаждения покрытий с широким спектром физико-механических свойств. Реализация многофакторных ЦКР планов позволила установить область режимов электролиза, в которой были получены качественные осадки, толщиной 0,2...1,0 мм, с выходом по току 80...90 %. Микротвердость осадков находилась в пределах 5,5...6,5 ГПа. В данной области условий электроосаждения покрытия имели упорядоченную пористую структуру, обеспечивающую их высокую маслосмкость и стойкость к задиру.

Вместе с тем, для реализации результатов исследований восстановления золотников гидрораспределителей необходимо было разработать общую технологическую схему восстановления деталей железнением в условиях гидромеханического активирования, осуществить опытную проверку технологии и работоспособности покрытий в условиях полевой эксплуатации и оценить технико-экономическую оценку технологии.

Технологический процесс должен включать следующие операции: предварительная подготовка поверхности (механическая обработка), обезжиривание, промывка, анодная обработка, электроосаждение и окончательная механическая обработка.

Очистку, мойку и дефектовку деталей можно принять стандартными согласно требованиям [3, 4]. Электрохимическое обезжиривание деталей целесообразно проводить в стандартном электролите при 1,0...2,0 А/дм² или венской известью.

Разработке технологии восстановления золотников гидрораспределителей предшествует, как правило, анализ состояния ремонтного фонда, на основе которого определяется основные составляющие величины припуска на предварительную механическую обработку [10]. При ванновом железнении для повышения эффективности восстановления деталей, как правило, рекомендуется разделить детали на размерные группы в зависимости от величины износа и установить для каждой группы необходимую продолжительность нанесения покрытий. При проточном железнении эту операцию можно исключить.

Учитывая, что исходная шероховатость деталей развивается в результате роста осадков, целесообразно предварительную механическую обработку завершить доводочными операциями (чистовым шлифованием и хонингованием). В этом случае сокращается припуск на окончательную механическую обработку и, соответственно, количество операций окончательной механической обработки покрытия.

Существенное упрощение технологии скоростного электроосаждения может быть достигнуто при выполнении операции анодной обработки и электроосаждения покрытия в рабочем электролите. Для полного удаления анодного шлама с поверхности детали необходимо поддерживать скорость потока и содержание абразивных частиц не менее 3 м/с и 80 г/л соответственно. Режимы анодной обработки: $T = 100...120$ с, $D_a = 6...10$ кА/м². Режимы необходимо уточнять в зависимости от марки стали, из которой изготовлен золотник.

Электроосаждение покрытия необходимо начинать с выхода на рабочий режим, который осуществляют в 3 этапа: установление плотности тока на уровне 0,05...0,2 кА/м² в течение 200...300 сек.; ступенчатое увеличение плотности тока до 5...10 кА/м² в течение 300...480 сек.; выход на рабочий режим в течение 60...180 сек. Скорость потока электролита на первом этапе выхода по току можно поддерживать на уровне 1...1,5 м/с. На втором этапе выхода на режим необходимо установить рабочую скорость потока электролита на уровне 3...5 м/с. В дальнейшем процесс ведут на рабочем режиме электроосаждения.

Время выхода на рабочий режим электроосаждения можно значительно сократить, если на начальном этапе установить высокую рабочую скорость потока электролита (6...8 м/с). В этом случае начальные плотности тока могут быть увеличены (до 1...3 кА/м²).

После нанесения покрытия ячейку с золотником отключают от установки. Затем золотник из ячейки демонтируют, промывают холодной водой и нейтрализуют в растворе каустической соды.

Предварительную механическую обработку восстановленных золотников рекомендуется проводить шлифованием на режимах, рекомендованных для закаленных сталей [10]. Для определения припуска на окончательную механическую обработку поверхности золотников гидрораспределителей можно применить известную методику [10].

Технологический процесс апробировался на участке ремонта гидрораспределителей ООО «ГидроРемСервис». Изношенные отверстия корпусов гидрораспределителей восстанавливали алмазным хонингованием и притиркой.

Нанесение покрытий проводили на опытной установке проточного железнения в лаборатории строительного института Брянского ГИТУ (рис. 7). Состав электролита: $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} - 500...550 \text{ кг/м}^3$, электрокорунд белый (марки F100) – 80...100 г/л. Режимы нанесения покрытий: $\text{pH} - 0,3-0,5$; $D_k - 100...500 \text{ А/дм}^2$; $T = 40-50 \text{ }^\circ\text{C}$; скорость потока ЭС – 3...4 м/с. Для нанесения покрытий на золотники гидрораспределителей была разработана электрохимическая ячейка (рис. 4).

После нанесения покрытий золотники шлифовали до требуемых размеров и притирали. Регулировку гидрораспределителей после сборки выполняли на стенде КИ-4815М.

Испытания гидрораспределителей с восстановленными золотниками проводили на опытном стенде ООО «ГидроРемСервис» и в хозяйствах Брянской области. Опытные гидрораспределители работали в период с марта 2018 г. по февраль 2020 г. на двух тракторах ЮМЗ-6, выполняющих различные виды сельскохозяйственных работ. Неисправностей ги-

дрораспределителей за период эксплуатации выявлено не было.

Таким образом, результаты эксплуатационных испытаний полностью подтвердили лабораторные исследования. Технологический процесс был принят к внедрению на ряде предприятий Брянской области. Техничко-экономическая оценка технологии восстановления деталей железнением при нестационарных режимах электролиза, выполненная на примере золотников гидрораспределителей, показала ее высокую эффективность в сравнении с ванновым способом. Основные факторы, определяющие эффективность технологии:

- сокращение производственных площадей, занятых технологическим оборудованием, за счет изменения технологической схемы процесса и применения одного и того же выпрямителя на операциях анодной обработки и нанесения покрытий;
- сокращение затрат времени и электроэнергии на восстановление деталей за счет увеличения производительности процесса железнения и сокращения числа операций;
- уменьшение затрат материалов для приготовления электролитов за счет сокращения операции анодной обработки и промывок;
- повышение надежности технологии за счет улучшения ее структурной схемы.

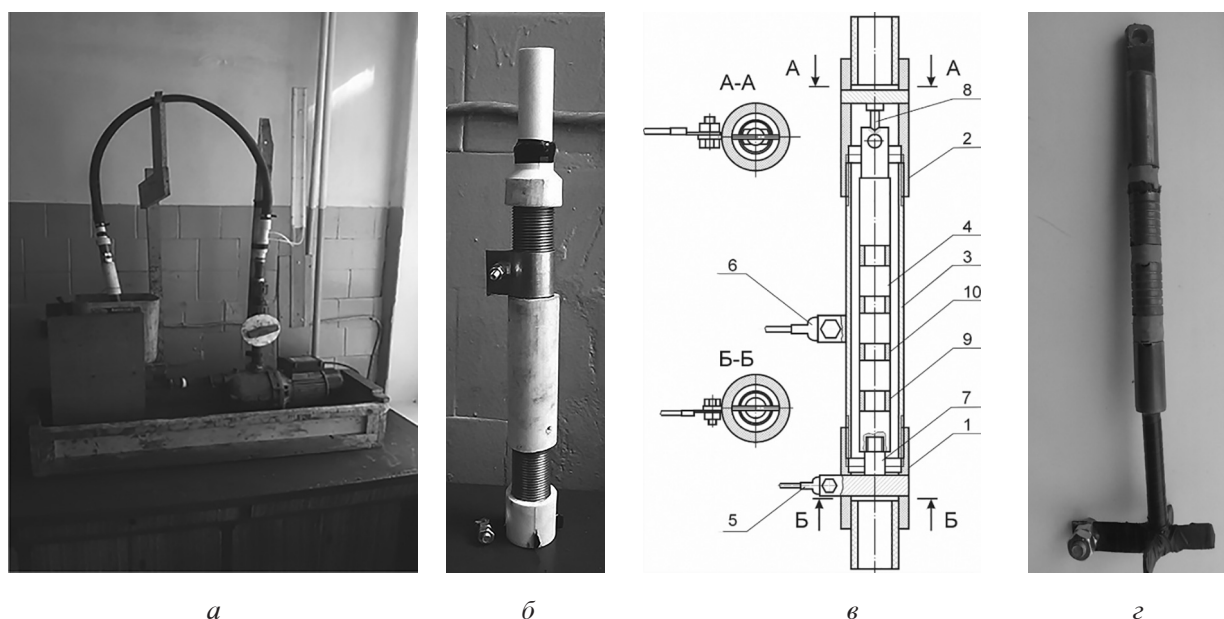


Рис. 7. Общий вид установки (а) и ячейки (б), схема ячейки (в) и золотник гидрораспределителя Р 100 после нанесения покрытия (г)

Fig. 7. General view of the installation (a) and the cell (b), scheme of the cell (c) and the valve of the P 100 hydraulic distributor after coating (d)

Вывод

Нанесение железных осадков в потоке электролита с одновременным гидромеханическим активированием наращиваемой поверхности (за счет воздействия скоростных гетерофазных потоков с грубодисперсными твердыми частицами) позволяет без ущерба для электрохимического процесса увеличить плотность тока (до 200...300 А/дм²) и значительно повысить производительность процесса. Установлены режимы нанесения качественных железных покрытий, имеющих высокую прочность сцепления и обладающих повышенной – до 2 раз – износостойкостью по сравнению с закаленными легированными сталями.

Разработаны технологический процесс, установка и оснастка нанесения покрытий на золотники гидрораспределителей. Проведена опытно-производственная проверка технологии, показавшая высокую эффективность и целесообразность ее внедрения на ремонтных предприятиях.

Литература

1. Юдин В.М., Вихарев М.Н., Слинко Д.Б. Восстановление посадочных отверстий корпусных деталей гальваническими покрытиями // Технический сервис машин. 2019. № 4 (137). С. 152–159.
2. Спицын И.А., Юдин В.М., Захаров Ю.А., Голубев И.Г. Восстановление чугунных деталей сельскохозяйственной техники гальваническим цинкованием с механической активацией катодной поверхности // Техника и оборудование для села. 2020. № 9 (279). С. 38–42.
3. Курчаткин В.В., Тататоркин В.М., Батищев А.Н., Голубев И.Г. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве. М.: Academia, 2013. 464 с.
4. Технология ремонта машин / под ред. Е.А. Пучина. М.: КолосС, 2007. 488 с.
5. Гурьянов Г.В. Электроосаждение износостойких композиций. Кишинев: Штиинца, 1986. 240 с.
6. Колемаев В.А., Староверов О.В., Турундаевский В.Б. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 1991. 400 с.
7. Юдин М.И. Планирование эксперимента и обработка его результатов. Краснодар: КГАУ, 2004. 239 с.
8. Кисель Ю.Е. Повышение долговечности деталей сельскохозяйственной техники электротермической обработкой композиционных электрохимических покрытий: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Саратов, 2014. 37 с.
9. Гурьянов Г.В., Кисель Ю.Е. Износостойкие электрохимические сплавы и композиты на основе железа. Брянск: БГИТА, 2015. 98 с.
10. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: справочник / В.И. Баранников [и др.]. М.: Машиностроение, 1990. 373 с.

References

1. Yudin V.M., Vikharev M.N., Slinko D.B. Restoration of bore holes of body parts with galvanized coatings. Tekhnicheskij servis mashin. 2019. No 4(137), pp. 152–159 (in Russ.).
2. Spitsyn I.A., Yudin V.M., Zakharov YU.A., Golubev I.G. Restoration of cast iron parts of agricultural machinery by galvanizing with mechanical activation of the cathode surface. Tekhnika i oborudovaniye dlya sela. 2020. No 9 (279), pp. 38–42 (in Russ.).
3. Kurchatkin V.V., Tatatorkin V.M., Batishev A.N., Golubev I.G. Tekhnicheskoye obsluzhivaniye i remont mashin v sel'skom khozyaystve [Maintenance and repair of machinery in agriculture]. Academia Publ., 2013. 464 p.
4. Tekhnologiya remonta mashin. Pod red. YE.A. Puchina. Moscow: KoloSS Publ., 2007. 488 p.
5. Gur'yanov G.V. Elektroosazhdeniye iznosostoykikh kompozitsiy [Electrodeposition of wear-resistant compositions]. Kishinev: Shtiintsa Publ., 1986. 240 p.
6. Kolemeyev V.A., Staroverov O.V., Turundayevskiy V.B. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika [Theory of probability and mathematical statistics]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1991. 400 p.
7. Yudin M.I. Planirovaniye eksperimenta i obrabotka yego rezul'tatov [Experiment planning and processing of its results]. Krasnodar: KGAU Publ., 2004. 239 p.
8. Kisel' YU.E. Povysheniye dolgovechnosti detaley sel'skokhozyaystvennoy tekhniki elektrotermicheskoy obra-botkoy kompozitsionnykh elektrokhimicheskikh pokrytiy: avtoref. dis. doktora tekhnicheskikh nauk [Increasing the durability of agricultural machinery parts by electrothermal treatment of composite electrochemical coatings: Dissertation for Degree of DSc in Engineering]. Saratov, 2014. 37 p.
9. Gur'yanov G.V., Kisel' YU.E. Iznosostoykiye elektrokhimicheskiye splavy i kompozity na osnove zheleza [Wear-resistant electrochemical iron-based alloys and composites]. Bryansk: Izd-vo BGITA Publ., 2015. 98 p.
10. Progressivnyye rezhushchiye instrumenty i rezhimy rezaniya metallov [Progressive cutting tools and cutting modes of metals]: spravochnik / V.I. Barannikov [i dr.]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1990. 373 p.