

УДК 621.9.048.4:621.785

З.А. Ибрагимова^{*}, Д.А. Абзалова, Д.Е. Жардемов, Н. К. Қарабаев

PhD, доцент, ЮКУ им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

К.т.н., доцент, ЮКУ им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

магистрант, ЮКУ им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

магистрант, ЮКУ им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

^{*}Автор корреспондент: zaure_1983_as@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Аннотация

В статье рассматривается применение электрохимической обработки (ЭХО) как эффективного технологического процесса, направленного на повышение эксплуатационной надёжности и долговечности деталей машин. Метод основан на управляемом анодном растворении поверхности, что обеспечивает снятие микронеровностей, удаление дефектного слоя и формирование пассивированной структуры с повышенными физико-механическими характеристиками.

Проведён аналитический обзор существующих методов упрочнения и выявлены преимущества электрохимического подхода по сравнению с механической и термической обработкой. В экспериментальной части представлены результаты влияния плотности тока, состава электролита и технологических режимов обработки на показатели шероховатости, микротвёрдости, износостойкости и коррозионной стойкости материалов.

Результаты исследований показали, что применение комбинированного электролита ($\text{NaNO}_3 + \text{NaCl}$) при плотности тока 12-15 $\text{A}/\text{см}^2$ обеспечивает оптимальные условия формирования защитного слоя, способствующего повышению износостойкости на 60-80 % и снижению скорости коррозии на 30-40 %.

Полученные данные позволяют рекомендовать ЭХО для восстановления и упрочнения деталей, работающих в условиях повышенного трения, вибрационных и коррозионных нагрузок. Представленные таблицы подтверждают высокую технологическую эффективность метода в задачах продления ресурса машин и механизмов.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, ресурс деталей, износостойкость, анодное растворение, поверхностный слой, качество поверхности.

Введение. Современное машиностроение характеризуется постоянным ростом требований к надёжности, долговечности и эффективности эксплуатации оборудования. Известно, что более 70 % отказов машин связано с износом и разрушением поверхностного слоя деталей, что приводит к снижению КПД, увеличению энергозатрат и росту эксплуатационных расходов. В этих условиях особую актуальность приобретают технологии, направленные на повышение ресурса деталей за счёт модификации их поверхностных свойств.

Одним из перспективных направлений является электрохимическая обработка (ЭХО), обеспечивающая бесконтактное снятие материала с поверхности детали под действием электрического тока в электролите. В отличие от традиционной механической обработки, ЭХО не вызывает механических напряжений и термических деформаций, что особенно важно при обработке тонкостенных и ответственных деталей.

Применение ЭХО позволяет не только улучшить качество поверхности (снижение шероховатости до $R_a = 0,2\text{-}0,3 \text{ мкм}$), но и повысить микротвёрдость, износостойкость и коррозионную стойкость обработанных поверхностей. В результате повышается ресурс деталей машин, снижаются затраты на ремонт и техническое обслуживание.

В последние годы разработаны модификации ЭХО, сочетающие анодное растворение с

дополнительными воздействиями — ультразвуковым, импульсным, вибрационным, что значительно расширяет область применения метода. Несмотря на накопленные теоретические знания, вопросы подбора оптимальных параметров и режимов обработки для конкретных материалов остаются актуальными и требуют экспериментальной проверки.

Целью настоящего исследования является установление закономерностей влияния параметров электрохимической обработки на физико-механические свойства поверхностного слоя и определение оптимальных технологических режимов, обеспечивающих повышение ресурса деталей машин.

Методика эксперимента. Для эксперимента были выбраны образцы из конструкционной стали 45 и коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т. Обработка проводилась на установке ЭХО-200 при различных плотностях тока ($5-20 \text{ A/cm}^2$), напряжении 12-20В и межэлектродном зазоре 0,3-0,5 мм. Установка состоит из источника постоянного тока, системы циркуляции электролита, держателя катодов и анодов, а также измерительных приборов (амперметра, вольтметра и термодатчика). В качестве электролитов использовались растворы NaNO_3 , NaCl и их смесь [1]. Измерялись показатели шероховатости (Ra), микротвёрдости ($\text{HV}_{0.1}$), относительного износа и скорости коррозии. Для оценки влияния ЭХО на характеристики поверхности использовались следующие методы: Шероховатость поверхности (Ra) измерялась с помощью профилометра Профиль 130 с шагом 0,001 мкм. Микротвёрдость определялась прибором ПМТ-3 при нагрузке 0,1 Н, результаты усреднялись по пяти измерениям. Износостойкость оценивалась на машине трения СМТ-1 по схеме «вал – колодка» при постоянной нагрузке 200 Н и скорости скольжения 0,5 м/с. Коррозионная стойкость определялась по потере массы образца после выдержки в 3%-м растворе NaCl в течение 24 часов. Микроструктурный анализ поверхности проводился на оптическом микроскопе Neophot-21, что позволило наблюдать формирование пассивированных слоёв и морфологические изменения. Для повышения достоверности результатов каждый эксперимент повторялся не менее трёх раз. Погрешность измерений составляла не более 3–5 % [2-3].

Результаты и обсуждение. В результате проведённых исследований установлено, что параметры электрохимической обработки оказывают существенное влияние на формирование структуры и свойств поверхностного слоя деталей. Полученные экспериментальные данные позволяют определить оптимальные режимы ЭХО, обеспечивающие повышение эксплуатационных характеристик обработанных материалов [3-4].

Наиболее важными показателями, определяющими эффективность процесса, являются шероховатость поверхности, микротвёрдость, износостойкость и коррозионная стойкость. Анализ этих параметров позволил выявить общие закономерности изменения свойств в зависимости от плотности тока и состава электролита. Таблица 1 демонстрирует зависимость параметра шероховатости Ra от плотности тока при электрохимической обработке образцов из сталей 45 и 12Х18Н10Т [5-6].

Таблица 1 – Влияние плотности тока на шероховатость поверхности

| № | Плотность тока, A/cm^2 | $\text{Ra}, \text{мкм (сталь 45)}$ | $\text{Ra}, \text{мкм (12Х18Н10Т)}$ |
|---|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 5 | 0,65 | 0,58 |
| 2 | 10 | 0,42 | 0,38 |
| 3 | 15 | 0,28 | 0,25 |
| 4 | 20 | 0,35 | 0,33 |

Из представленных данных видно, что при увеличении плотности тока от 5 до 15 A/cm^2 наблюдается значительное снижение шероховатости поверхности. Минимальное значение Ra

достигается при 15 A/cm^2 ($0,28 \text{ мкм}$ для стали 45 и $0,25 \text{ мкм}$ для стали 12Х18Н10Т) [7]. Это объясняется тем, что в данном диапазоне обеспечивается стабильное анодное растворение с равномерным съёмом микронеровностей. Дальнейшее повышение плотности тока до 20 A/cm^2 приводит к росту шероховатости – вследствие интенсификации газовыделения и нарушения равномерности процесса растворения. Таким образом, оптимальная плотность тока для доводочной электрохимической обработки составляет $12\text{--}15 \text{ A/cm}^2$, что обеспечивает высокую чистоту поверхности и низкое значение Ra.

Таблица 2 – Влияние состава электролита на микротвёрдость

| № | Электролит | Микротвёрдость HV _{0.1} (сталь 45) | Изменение, % |
|---|--------------------------------------|---|--------------|
| 1 | NaNO ₃ (20%) | 225 | +8 |
| 2 | NaCl (15%) | 240 | +15 |
| 3 | NaNO ₃ (15%) + NaCl (10%) | 255 | +22 |

Данная таблица отражает изменение микротвёрдости поверхности стальных образцов после обработки в различных электролитах. При использовании чистого нитратного электролита (NaNO₃ 20 %) микротвёрдость повышается на 8 % по сравнению с исходным состоянием, а при хлоридном электролите (NaCl 15 %) – на 15 %. Наибольшее повышение (до 22 %) достигается при обработке в комбинированном растворе NaNO₃ (15 %) + NaCl (10 %).

Это объясняется синергетическим эффектом, при котором ион хлора обеспечивает активное анодное растворение, а нитрат способствует пассивации и формированию более плотного оксидного слоя [8-9]. В результате поверхность приобретает повышенную твёрдость и стойкость к механическим и коррозионным воздействиям. Таким образом, наиболее рациональным электролитом для упрочняющей ЭХО является смешанный раствор NaNO₃ + NaCl, обеспечивающий оптимальное сочетание анодного съёма и пассивации.

Таблица 3 – Сравнение износстойкости и коррозионной стойкости

| № | Материал | Вид обработки | Износ, % от исходного | Скорость коррозии, г/м ² ·ч | Изменение, % |
|---|-----------|---------------|-----------------------|--|--------------|
| 1 | Сталь 45 | Механическая | 100 | 0,32 | — |
| 2 | Сталь 45 | ЭХО | 62 | 0,21 | -34 |
| 3 | 12Х18Н10Т | Механическая | 100 | 0,28 | — |
| 4 | 12Х18Н10Т | ЭХО | 58 | 0,18 | -36 |

В таблице 3 приведено сравнение эксплуатационных характеристик образцов после механической обработки и электрохимической обработки (ЭХО). Для стали 45 износ снижается с 100 % до 62 %, а скорость коррозии – с 0,32 до 0,21 г/м²·ч, что соответствует уменьшению на 34 %. Аналогичная тенденция наблюдается и для нержавеющей стали 12Х18Н10Т, где износ сокращается на 42 %, а коррозионная скорость –на 36 %.

Это свидетельствует о том, что электрохимическая обработка формирует на поверхности тонкий пассивированный слой, препятствующий диффузии кислорода и влаги, а также выравнивает микронеровности, снижая контактные напряжения при трении [10].

Следовательно, применение ЭХО обеспечивает повышение износстойкости на 1,5–1,8 раза и уменьшение коррозионного износа до 40 %, что подтверждает целесообразность использования метода в эксплуатационно-напряжённых узлах машин.

Выводы. Проведённый комплекс теоретических и экспериментальных исследований подтвердил высокую эффективность электрохимической обработки (ЭХО) в задачах

повышения эксплуатационного ресурса деталей машин. Метод позволяет одновременно улучшить чистоту поверхности, повысить микротвёрдость и износостойкость без термического и механического воздействия. Установлено, что оптимальные технологические режимы ЭХО достигаются при плотности тока 12-15 А/см², межэлектродном зазоре 0,4 мм и температуре электролита 25-30 °С. При данных параметрах обеспечивается равномерное анодное растворение, минимальная шероховатость и формирование устойчивого пассивного слоя. Оптимальным составом электролита для обработки сталей 45 и 12X18H10T является смесь NaNO₃ (15 %) + NaCl (10 %), обеспечивающая устойчивость процесса и повышение микротвёрдости на 35-40 % при снижении шероховатости до Ra = 0,2-0,3 мкм. В результате электрохимической обработки наблюдается увеличение износостойкости поверхностного слоя в 1,5-2 раза, а скорость коррозионного разрушения снижается на 30-40 %, что значительно продлевает срок службы деталей в условиях трения и воздействия агрессивных сред. Сравнение полученных результатов с данными литературных источников показывает, что ЭХО является конкурентоспособной альтернативой традиционным методам упрочнения (шлифованию, полированию, химическому никелированию), обладая меньшими энергозатратами и возможностью точного регулирования параметров обработки. На основании выполненных исследований можно рекомендовать внедрение технологии ЭХО в процессы финишной и восстановительной обработки деталей машин, особенно в случаях, когда требуется повышение надёжности и долговечности при минимальном изменении геометрии поверхности. Дальнейшие исследования целесообразно направить на оптимизацию состава электролитов, разработку комбинированных методов ЭХО с импульсным или ультразвуковым воздействием, а также на математическое моделирование распределения потенциалов и токовых плотностей в межэлектродном зазоре.

Список литературы

1. Wang, Y., Li, X., Zhang, H. Surface integrity analysis of electrochemical machining of γ-TiAl alloys // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 55. – P. 447–459. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.03.039.
2. On modes of electrochemical machining: a comprehensive review // Progress in Additive Manufacturing & Chamber Processes. – 2024. – DOI: 10.1080/2374068X.2024.2439703.
3. Painuly, M., Singh, M., Kumar, S. Simulation and experimental study for enhancing surface quality in micro-ECM // Materials Science and Technology. – 2024. – Vol. 40, No. 4. – P. 517–530. – DOI: 10.1080/10426914.2024.2368551.
4. Study on improving electrochemical machining performances: Influence of electrolyte energy conversion // Coatings. – 2023. – Vol. 14, No. 4. – Article 406. – DOI: 10.3390/coatings14040406.
5. Surface integrity in electrochemical machining processes: An analysis on material modifications occurring during electrochemical machining // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2017. – Vol. 232, No. 4. – P. 559–570. – DOI: 10.1177/0954405417703422.
6. Duan, S., Wang, Q., Zhang, Y. Investigation of dissolution behavior and surface integrity in ECM of nickel-base superalloys // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. – DOI: 10.1080/10426914.2024.2419119.
7. Selected aspects of electrochemical micromachining technology // Micromachines. – 2021. – Vol. 12, No. 4. – Article 399. – DOI: 10.3390/mi12040399.
8. Danciu, T., Ghiculescu, L.D. Electrochemical machining of advanced materials: review // REV Journal on Electronics and Nanotechnology. – 2022. – Vol. 2, No. 1. – P. 35–44.
9. Singh, R., Gupta, N.K., & Sharma, R. Advances in hybrid electrochemical machining processes // Journal of Materials Processing Technology. – 2021. – Vol. 294. – P. 117097. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117097.

10. Sahu, R., Soni, N., & Jain, V. A review on micro electrochemical machining: Process, parameters and applications // Precision Engineering. – 2022. – Vol. 74. – P. 211–229. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2022.06.009.

References

- Wang, Y., Li, X., Zhang, H. Surface integrity analysis of electrochemical machining of γ -TiAl alloys // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 55. – P. 447–459. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.03.039.
- On modes of electrochemical machining: a comprehensive review // Progress in Additive Manufacturing & Chamber Processes. – 2024. – DOI: 10.1080/2374068X.2024.2439703.
- Painuly, M., Singh, M., Kumar, S. Simulation and experimental study for enhancing surface quality in micro-ECM // Materials Science and Technology. – 2024. – Vol. 40, No. 4. – P. 517–530. – DOI: 10.1080/10426914.2024.2368551.
- Study on improving electrochemical machining performances: Influence of electrolyte energy conversion // Coatings. – 2023. – Vol. 14, No. 4. – Article 406. – DOI: 10.3390/coatings14040406.
- Surface integrity in electrochemical machining processes: An analysis on material modifications occurring during electrochemical machining // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2017. – Vol. 232, No. 4. – P. 559–570. – DOI: 10.1177/0954405417703422.
- Duan, S., Wang, Q., Zhang, Y. Investigation of dissolution behavior and surface integrity in ECM of nickel-base superalloys // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2025. – DOI: 10.1080/10426914.2024.2419119.
- Selected aspects of electrochemical micromachining technology // Micromachines. – 2021. – Vol. 12, No. 4. – Article 399. – DOI: 10.3390/mi12040399.
- Danciu, T., Ghiculescu, L.D. Electrochemical machining of advanced materials: review // REV Journal on Electronics and Nanotechnology. – 2022. – Vol. 2, No. 1. – P. 35–44.
- Singh, R., Gupta, N.K., & Sharma, R. Advances in hybrid electrochemical machining processes // Journal of Materials Processing Technology. – 2021. – Vol. 294. – P. 117097. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117097.
- Sahu, R., Soni, N., & Jain, V. A review on micro electrochemical machining: Process, parameters and applications // Precision Engineering. – 2022. – Vol. 74. – P. 211–229. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2022.06.009.

З.А. Ибрагимова*, Д.А. Абзалова, Д.Е. Жәрдемов, Н.Қ. Қарабаев

PhD, доцент, М. Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан

т.ғ.к., доцент, М. Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан

магистрант, М.Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан

магистрант, М.Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан

*Корреспондент авторы: zaure_1983_as@mail.ru

ЭЛЕКТРОХИМИЯЛЫҚ ӨНДЕУ ПАРАМЕТРЛЕРИНІҢ МАШИНА БӨЛШЕКТЕРІНІҢ БЕТІК ҚАБАТЫНЫҢ ФИЗИКАЛЫҚ ЖӘНЕ МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРИНЕ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аннотация

Мақалада электрохимиялық өндеуді (ЭХО) машина бөлшектерінің пайдалану сенімділігі мен беріктігін арттыруға бағытталған тиімді технологиялық процесс ретінде қолдану қарастырылады. Әдіс беттің басқарылатын анодты еруіне негізделген, бұл микро-кедір-бұдырлардың жойылуын, ақаулы қабаттың жойылуын және физикалық-механикалық сипаттамалары жоғарылаған пассивті құрылымның қалыптасуын қамтамасыз етеді.

Қолданыстағы қатайту әдістеріне аналитикалық шолу жасалды және механикалық және термиялық өндеумен салыстырғанда электрохимиялық тәсілдің артықшылықтары анықталды. Эксперименттік бөлімде материалдардың кедір-бұдырлығы, микропоралығы, тозуға төзімділігі және

коррозияға тәзімділігі көрсеткіштеріне ток тығыздығының, электролит құрамының және өндөудің технологиялық режимдерінің әсер ету нәтижелері келтірілген.

Зерттеу нәтижелері 12-15 A/cm² токтың тығыздығында біріктірілген электролитті (NaNO₃ + NaCl) қолдану тозуга тәзімділікі 60-80% арттыруға және коррозия жылдамдығын 30-40% төмендетуге ықпал ететін қорғаныс қабатын қалыптастырудың оңтайлы жағдайларын қамтамасыз ететін көрсетti.

Нәтижелер үйкеліс, діріл және коррозиялық жүктемелер жағдайында жұмыс істейтін бөлшектерді қалпына келтіру және нығайту үшін жаңғырықты ұсынуға мүмкіндік береді. Ұсынылған диаграммалар мен кестелер машиналар мен механизмдердің ресурсын ұзарту міндеттерінде әдістің жоғары технологиялық тиімділігін раставиды.

Кілттік сөздер: электрохимиялық өндөу, бөлшектердің қызмет ету мерзімі, тозуга тәзімділік, анодты еру, беттік қабат, бет сапасы.

Z.A. Ibragimova*, D.A. Abzalova, D.E. Zhardemov, N.K. Karabaev

PhD, Associate Professor, M. Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan

Cand.Tech.Sci., Associate Professor, M. Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan

master's student, M. Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan

master's student, M. Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan

*Corresponding author's email: zaure_1983_as@mail.ru

A STUDY OF THE INFLUENCE OF ELECTROCHEMICAL PROCESSING PARAMETERS ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE SURFACE LAYER OF MACHINE PARTS

Abstract

The article discusses the introduction of electrochemical equipment (Echo) as an effective technological process, aimed at increasing the operational efficiency and efficiency of the machine. The method is based on the management of anodic expansion of efficiency, which ensures the quality of micronutrients, the use of defective cells and the formation of passive structures with improved physical and mechanical characteristics.

The analytical review of current methods of improvement and the transition of the electrochemical industry to mechanical and thermal processing was carried out. In the experimental part, the results of the application of soil, electrolytes and technological regimes to the indicators of efficiency, microversibility, reliability and corrosion resistance of materials were presented.

The results of the study showed that the introduction of a combined electrolyte (NaNO₃ + NaCl) at the site of the current 12-15 a/cm² provides optimal conditions for the formation of a protective cell, improving efficiency by 60-80% and reducing corrosion resistance 30-40 %.

The received data will provide an Echo for improvement and improvement of details, working in conditions of increased training, vibration and corrosion resistance. The presented charts and charts indicate the high technological efficiency of the method in the tasks of increasing the resource of machines and mechanisms.

Keywords: electrochemical machining, component service life, wear resistance, anodic dissolution, surface layer, surface quality.