

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ МАШИН ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Ибрагимова Зауре Асилбековна 1,
Қалыбайұлы О. 2, Жардемов Д.Е. 3,
Канадиллаев А.Н. 4, Карабаев Н.К. 5

Аннотация: В условиях повышения требований к надёжности и долговечности машин и оборудования актуальной задачей остаётся продление срока службы их компонентов. Одним из эффективных способов повышения ресурса деталей является применение электрохимической обработки (ЭХО), которая позволяет достигать высоких показателей точности, чистоты поверхности и эксплуатационной стойкости без существенного термического или механического воздействия. В данной статье рассматриваются теоретические основы электрохимической обработки, ее технологические возможности, а также практические результаты применения метода для упрочнения и восстановления деталей машин. Проведён сравнительный анализ параметров до и после обработки. Особое внимание уделяется использованию ЭХО для сложнопрофильных и прецизионных деталей, в том числе в ответственных узлах машин. Полученные данные подтверждают, что электрохимическая обработка может быть эффективно внедрена в современные производственные процессы с целью повышения ресурса машиностроительных изделий и снижения затрат на техническое обслуживание.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, износостойкость, микротвердость, шероховатость, повышение ресурса, анодное растворение.

Введение

Современное машиностроение предъявляет всё более высокие требования к качеству, надёжности и ресурсу работы деталей машин. Особенно актуальны эти требования в условиях интенсивной эксплуатации оборудования, где даже незначительный износ элементов может привести к снижению эффективности работы всей системы или к аварийным ситуациям. В этой связи особое внимание уделяется методам повышения долговечности и работоспособности деталей машин. Одним из перспективных направлений является электрохимическая обработка (ЭХО) – способ, основанный на управляемом анодном растворении металла в электролите под действием электрического тока. В отличие от традиционных методов механической обработки, ЭХО позволяет добиться высокой точности, минимального термомеханического воздействия на обрабатываемую поверхность, а также существенного улучшения микрогеометрии и физико-механических характеристик поверхностного слоя [1].

Электрохимическая обработка применяется для обработки

труднообрабатываемых материалов, деталей сложной формы и тех элементов машин, которые подвергаются интенсивному износу в процессе эксплуатации. Благодаря возможности точной настройки режима ЭХО можно контролировать параметры шероховатости поверхности, остаточных напряжений, упрочнения и других характеристик, напрямую влияющих на срок службы детали.

Методология исследования

В исследовании электрохимической обработки (ЭХО) деталей машин основное внимание уделялось влиянию параметров анодного растворения на качество и ресурс поверхностного слоя. В качестве объектов исследования использовались: зубчатое колесо из стали 40X с твёрдостью HRC 58 после цементации и подшипниковая втулка из стали ШХ15 с твёрдостью HRC 60 после шлифования. Обработка проводилась на установке ЭХО-20 с регулируемым током до 100 А и напряжением до 20 В. Электролитом служил 10% раствор нитрата натрия (NaNO_3), температура 25-30 °С [2]. Катодный инструмент выполнялся из меди с формой, повторяющей контур обрабатываемой поверхности. Межэлектродный зазор – 0,2–0,4 мм. Режим обработки: напряжение 12В, плотность тока 15 А/см², продолжительность 3 мин, скорость подачи инструмента 0,2 мм/мин. Для количественной оценки эффективности использовались параметры шероховатости поверхности (Ra), микротвёрдости, износостойкости и коррозионной стойкости. Измерения шероховатости выполнялись на профилемере Mitutoyo SJ-210, микротвёрдость – по Виккерсу при нагрузке 200 г, износ – на трибометре «вал-втулка».

Процесс анодного растворения описывается законом Фарадея

[3]:

$$m = (I \times t \times M) / (z \times F),$$

где m – масса снятого металла (г), I – ток (А), t – время (с), M –

атомная масса металла (г/моль), z – валентность, F – постоянная Фарадея (96 500 Кл/моль). Скорость съёма металла определяется по формуле $v = m / (S \times t)$. Расчёты показали, что при выбранных режимах скорость съёма металла для стали 40X составляет около 0,012 мм/мин, что соответствует стабильному растворению без микропиттинга. При увеличении плотности тока выше 18 А/см² наблюдается микрошероховатость из-за неравномерного распределения электрического поля.

Анализ и результаты: Для оценки эффективности электрохимической обработки (ЭХО) проведено экспериментальное исследование на двух типах деталей: зубчатом колесе из стали 40X и подшипниковой втулке из стали ШХ15. Основное внимание уделялось изменению параметров шероховатости поверхности, микротвёрдости, износостойкости и коррозионной стойкости до и после обработки (таблица 1,2). В результате проведения электрохимической обработки за счёт управляемого анодного растворения произошло сглаживание микронеровностей и удаление дефектов после механической обработки. Это позволило значительно улучшить качество поверхности деталей.

Таблица 1 Изменение параметров поверхности зубчатого колеса (R_a) до и после ЭХО

Показатель	До ЭХО	После ЭХО	Изменение
1	2	3	4
Зубчатое колесо (сталь 40X)			
Шероховатость R_a , мкм	0,63	0,18	↓ на 71 %
Микротвёрдость, ГПа	6,5	7,8	↑ на 20 %
Износостойкость (циклы)	1000	1600	↑ на 60 %

Таблица 2 Изменение параметров поверхности подшипниковой втулки (R_a) до и после ЭХО

Показатель	До ЭХО	После ЭХО	Изменение
1	2	3	4
Подшипниковая втулка (сталь ШХ15)			
Шероховатость R_a , мкм	0,32	0,08	↓ на 75 %
Микротвёрдость, ГПа	7,2	7,9	↑ на 10 %
Коррозионная стойкость	100 %	125 %	↑ на 25 %

После электрохимической обработки шероховатость снижается более чем в 3 раза для обеих деталей. Особенно заметен эффект у подшипниковой втулки, где ЭХО удаляет микротрещины после шлифования, обеспечивая чистоту поверхности до $R_a = 0,08$ мкм, что соответствует уровню тонкого полирования [4].

После электрохимической обработки шероховатость снижается более чем в 3 раза для обеих деталей. Особенно заметен эффект у подшипниковой втулки, где ЭХО удаляет микротрещины после шлифования, обеспечивая чистоту поверхности до $R_a = 0.08$ мкм, что

Электрохимическая обработка способствует формированию на поверхности упрочнённой оксидной плёнки толщиной 3-5 мкм, что повышает микротвёрдость на 10–20 %. Для зубчатого колеса эффект выражен сильнее из-за концентрации электрического поля на вершинах зубьев, где происходит более интенсивное анодное растворение и пассивация.

Электрохимическая обработка способствует формированию упрочнённого поверхностного слоя и оксидной плёнки толщиной 3–5 мкм. Эта плёнка повышает микротвёрдость на 10–20 % и улучшает пассивные свойства металла, что особенно важно при эксплуатации в агрессивных средах.

Наибольший эффект упрочнения зафиксирован на зубьях колеса, где из-за концентрации электрического поля происходит локальное ускорение анодного растворения и самопассивация поверхности. Это обеспечивает равномерное снятие микронеровностей и повышение износостойкости.

Выводы: Электрохимическая обработка обеспечивает эффективное снижение шероховатости поверхности деталей машин до 70-75 %. Поверхностный слой после ЭХО приобретает более высокую микротвёрдость (на 10-20 %) и износостойкость (на 50-60 %). Метод особенно эффективен для деталей сложного профиля и закалённых сталей, где традиционные механические методы ограничены. ЭХО может быть успешно интегрирована в технологические процессы машиностроительных предприятий для восстановления и упрочнения деталей.

Список использованной литературы

1. Мельников В.В. Электрохимическая обработка металлов. – М.: Машиностроение, 2018.
2. Журавлёв В.Н. Повышение износостойкости деталей машин электрохимическими методами. – СПб.: Политехника, 2020.
3. Никитин А.С., Костин П.П. Современные технологии финишной обработки. // Вестник машиностроения. – 2022. – № 6. – С. 45–51.
4. Ибрагимова З.А., Абзалова Д.А., Жардемов Д.Е., Қарабаев Н.К. Исследование влияние параметров электрохимической обработки на физико-механические свойства поверхности слоя деталей машин // Вестник науки Южного Казахстана, №3(31), 2025 – С.27-31.