

Применение импульсных режимов при электрохимическом полировании коррозионностойких сталей

Канд. техн. наук, доц. Ю. Г. Алексеев¹⁾, канд. техн. наук А. Ю. Королёв¹⁾,
канд. техн. наук, доц. В. С. Нисс¹⁾, инж. А. Э. Паршуту¹⁾, асп. А. С. Будницкий¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Электрохимическое полирование (ЭХП) поверхности металлов и сплавов в настоящее время является одним из наиболее прогрессивных технологических процессов повышения качества поверхности, несмотря на то, что используется в промышленности на протяжении многих десятилетий. В основном это связано с рядом существенных преимуществ процесса по сравнению с механическим полированием с применением свободного или связанного абразива. Однако ЭХП в его классическом виде имеет ряд существенных недостатков. Один из них – зависимость режимов обработки и составов электролита от обрабатываемого материала. Кроме того, для ЭХП применяются агрессивные дорогостоящие электролиты, требующие специальных технологий по утилизации. Электролиты при ЭХП часто разогреваются до температуры 60–90 °С. Обработка при таких температурах наносит значительный вред окружающей среде и производственному персоналу. Для устранения существующих недостатков процесса ЭХП и расширения его технологических возможностей предложен способ обработки с применением импульсных униполярных и биполярных режимов. В результате разработаны принципиально новые процессы импульсного ЭХП с длительностью импульсов 0,05–20,00 мс, обеспечивающие по сравнению традиционной обработкой на постоянном токе снижение энергетических затрат на процесс и высокую эффективность полирования, при котором скорость сглаживания микронеровностей обрабатываемой поверхности, отнесенная к общему съему металла, значительно возрастает. Применение импульсных режимов по сравнению с традиционным ЭХП позволяет выполнять обработку в универсальных электролитах простых составов на основе серной и ортофосфорной кислот без добавления хромового ангидрида. Применение разработанных импульсных режимов, которые при малом съеме металла обеспечивают существенное изменение шероховатости поверхности, наиболее целесообразно при ЭХП точных деталей, изделий или деталей малого сечения и жесткости, например, медицинских изделий для малоинвазивной хирургии, деталей точного машиностроения и др. В статье приводятся результаты исследования влияния импульсных униполярных и биполярных режимов ЭХП на качество поверхности образцов из коррозионностойкой стали, а также сравнительный анализ эффективности использования импульсных режимов ЭХП вместо постоянного тока. Установлены технологические параметры ЭХП с применением импульсных режимов, обеспечивающие наиболее качественное полирование поверхности с высокой эффективностью сглаживания микронеровностей и низкими энергозатратами.

Ключевые слова: импульс, электрохимическое полирование, электролит, шероховатость, плотность тока, напряжение, эффективность

Для цитирования: Применение импульсных режимов при электрохимическом полировании коррозионностойких сталей / Ю. Г. Алексеев [и др.] // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 3. С. 200–208. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-200-208>

Use of Pulsed Modes in Electrochemical Polishing of Corrosion-Resistant Steels

Yu. G. Aliakseyeu¹⁾, A. Yu. Korolyov¹⁾, V. S. Niss¹⁾, A. E. Parshuto¹⁾, A. S. Budnitskiy¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Electrochemical polishing (ECP) of metal and alloy surface is currently one of the most advanced technological processes to improve quality of the surface, despite the fact that it has been used in industry for many decades. This is mainly due to a number of significant advantages of the process compared to mechanical polishing using free or bonded abrasive.

Адрес для переписки

Королёв Александр Юрьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-25-98
korolyov@park.bntu.by

Address for correspondence

Korolyov Aleksandr Yu.
Belarusian National Technical University
24 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-25-98
korolyov@park.bntu.by

However, the ECP in its classical form has a number of significant drawbacks. One of them is a dependence of treatment modes and electrolyte compositions on the processed material. In addition, aggressive expensive electrolytes that require special technologies for disposal are used for ECP. Electrolytes in ECP often require heating to a temperature of 60–90 °C. Processing at such temperatures causes significant harm to the environment and production personnel. To eliminate the existing disadvantages of the ECP and expand its technological capabilities, a processing method with application of pulsed unipolar and bipolar modes has been proposed. As a result, fundamentally new processes of pulse ECP with a pulse duration of 0.05–20.00 ms have been developed. They provide a reduction of energy costs for the process and high efficiency of polishing in comparison with traditional DC polishing. The rate of smoothing micro-roughness of the treated surface related to the total metal removal is significantly increased. The use of pulse modes in comparison with traditional ECP allows processing in universal electrolytes of simple compositions based on sulfuric and orthophosphoric acids without addition of chromium anhydride. Application of the developed pulse modes, which will provide at low metal removal a significant change in surface roughness, is the most appropriate for the ECP of precise parts, products or parts of small cross-section and rigidity, such as medical devices for minimally invasive surgery, precision engineering parts, etc. The paper presents results of a study for influence of pulsed unipolar and bipolar ECP modes on the surface quality of stainless steel specimens, as well as a comparative analysis of the efficiency of using pulsed ECP modes instead of DC polishing. The technological parameters of ECP using pulsed modes, providing the highest quality surface polishing with high efficiency of micro-roughness smoothing and low energy consumption have been established in the paper.

Keywords: pulse, electrochemical polishing, electrolyte, roughness, current density, voltage, efficiency

For citation: Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuto A. E., Budnitskiy A. S. (2019) Use of Pulsed Modes in Electrochemical Polishing of Corrosion-Resistant Steels. *Science and Technique*. 18 (3), 200–208. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-200-208> (in Russian)

Введение

Коррозионноустойчивая сталь получила широкое распространение в медицине в качестве стерильного, устойчивого и безопасного материала, который можно неоднократно подвергать воздействию агрессивной среды дезинфицирующих химических веществ [1–3]. Из коррозионноустойчивой стали изготавливают хирургические импланты (стенды, катетеры, вальвулотомы, гильзы для зубных коронок и др.), хирургические и эндодонтические инструменты (зондирующие, оттесняющие), а также специальные микроинструменты, имеющие малые размеры рабочих частей (дрельборты, пульпоэкстракторы, каналонаполнители, буравы корневые и др.) [4–7]. Как правило, предъявляются повышенные требования к качеству рабочих поверхностей таких медицинских изделий, что обусловлено их эксплуатационными характеристиками.

Традиционными и самыми распространенными способами улучшения качества поверхности являются методы механического, электрохимического полирования (ЭХП) и электролитно-плазменного полирования (ЭПП) [8–12]. Недостатки механических методов – высокая ресурсоемкость, ограничения по сложности формы изделий и дефекты в виде неметаллических включений [12]. Большинство недостатков механической полировки можно избежать, используя ЭХП или ЭПП [9–11]. ЭХП в своем классическом виде имеет ряд существенных

недостатков, которые в условиях современной промышленности недопустимы. Использование дорогостоящих электролитов, обладающих высокой токсичностью и негативно влияющих на технологическое оборудование, обслуживающий персонал и окружающую среду, превращает ЭХП в неэффективную технологию с экономической и экологической точек зрения [9]. Кроме того, качество ЭХП зависит не только от состава электролита, но и от химического состава, структуры полируемого металла. Наличие даже малых количеств легирующих элементов ведет к значительному ухудшению качества обработанной поверхности. Использовать дешевые и экологически чистые электролиты позволяет применение ЭПП [9], производительность и экономическая эффективность технологических операций которого в пять–шесть раз больше, чем при ЭХП в растворах кислот. Однако ЭПП обладает значительной энергоемкостью и требует использования усиленных мер электробезопасности из-за высокого рабочего напряжения [10]. Кроме того, в процессе ЭПП затруднены контроль и управление съемом металла. В связи с этим повышается актуальность создания альтернативного способа полировки сложнопрофильных изделий медицинского назначения с использованием современных и прогрессивных технологий.

Импульсные и реверсные токи при ЭХП находят все более широкое распространение в современной промышленности при финишной

обработке малогабаритных изделий, имеющих труднодоступные для других способов участки поверхности. Метод импульсного ЭХП характеризуется как эффективный для удаления заусенцев, скругления острых кромок, очистки и полирования поверхности ювелирных изделий [11], деталей точной механики, медицинского инструментария, имплантатов [12], корпусов часов, мебельной фурнитуры, зубных протезов и др. Основное преимущество применения импульсных и реверсивных токов состоит в гибкости и стабильности процесса. Данная технология полировки является более эффективной благодаря улучшенной локализации анодного растворения [13] и простоте контроля глубины обработки по сравнению с полировкой при постоянном токе [14].

Высокое качество ЭХП достигается, когда скорости анодного растворения и пассивации поверхности соизмеримы и достаточно высоки [15]. Это приводит к ускоренному растворению активированных микровыступов обрабатываемой поверхности по сравнению с пассивированными микровпадинами, что обеспечивает сглаживание микрорельефа. Максимальные величины поляризации, связанные с анодным растворением и пассивацией, достигаются не сразу, а развиваются с различной динамикой в микро- и миллисекундном диапазоне времени [15]. Поэтому, варьируя значениями электрических характеристик в данном временном диапазоне, можно сформировать анодный потенциал, обеспечивающий оптимальное соотношение скоростей растворения и пассивационных процессов, способствующих получению наивысшей скорости сглаживания микрорельефа поверхности.

Обработка с использованием биполярных импульсов имеет несколько основных электрических характеристик: анодный импульс, катодный импульс и паузу [16] (рис. 1). Анодный импульс i_a предназначен для контроля скорости удаления материала и установления оптимальной плотности тока. Катодный импульс i_k необходим для депассивации (удаления оксидной пленки) обрабатываемой поверхности. Благодаря катодному импульсу пропадает необходимость использования ряда оксидоудаляющих химических добавок в рабочем растворе [16]. Пауза используется для восстановления концентрации активных частиц в зоне обработки

и удаления продуктов полирования. Несмотря на то что биполярная импульсная электрохимическая обработка имеет катодный период t_k и паузу между импульсами, скорость удаления материала, как правило, оказывается выше или равной скорости при постоянном токе [17].

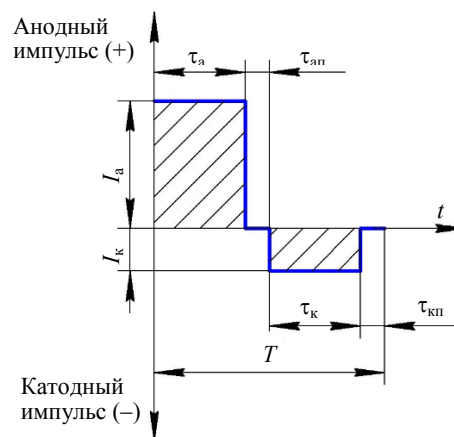


Рис. 1. Обобщенная форма импульсов биполярной импульсной электрохимической обработки
 Fig. 1. Generalized form of pulses for bipolar pulse electrochemical machining

Цель настоящей работы – исследование влияния импульсных униполярных и биполярных режимов ЭХП на качество поверхности образцов из коррозионностойкой стали, сравнительный анализ эффективности использования импульсных режимов вместо постоянного тока в процессе ЭХП, а также установление технологических параметров импульсного ЭХП, обеспечивающих наиболее качественное полирование поверхности с высокой эффективностью сглаживания микронеровностей и низкими энергозатратами.

Материалы, оборудование и методы исследований

В ходе исследований выполнялся сравнительный анализ производительности, качества и эффективности обработки поверхности образцов после ЭХП с различными видами технологического тока: ЭХП на постоянном токе и импульсное ЭХП с униполярными и биполярными режимами.

Исследования проводили на плоских образцах из коррозионностойкой стали 12Х8Н10Т размерами 50×15×1,5 мм. Образцы предваритель-

но обрабатывали шлифовальной бумагой SiC зернистостью P300. ЭХП образцов выполняли в электролите следующего состава: 50 % – ортофосфорная кислота (H_3PO_4); 25 – серная кислота (H_2SO_4); 20 – глицерин ($C_3H_8O_3$); 5 % – дистиллированная вода (H_2O). Температура электролита поддерживалась в пределах $(33 \pm 5) ^\circ C$. Необходимое значение плотности тока устанавливалось путем изменения напряжения. Продолжительность обработки каждого образца составляла 3 мин.

Для обработки образцов разработано экспериментальное оборудование, состоящее из биполярного регулируемого источника постоянного напряжения [18], блока системы формирования биполярных импульсов заданной длительности, ванны с устройствами нагрева, охлаждения и перемешивания электролита (рис. 2).



Рис. 2. Экспериментальное оборудование для выполнения исследований

Fig. 2. Experimental equipment for research

Изменение шероховатости поверхности производили профилометром MarSurf PS1. Контроль и запись формы импульсов тока осу-

ществляли запоминающим цифровым осциллографом С8-46/1. Убыль массы образцов после обработки измеряли с помощью аналитических весов Ohaus Pioneer PA214. Для оценки изменения блеска поверхности образцов до и после обработки использовали специально разработанное устройство, позволяющее получить количественную характеристику блеска в процентах относительно эталонной поверхности. Эталонной поверхностью служило зеркало, коэффициент отражения которого приравнялся к 100 %. Устройство содержало источник направленного света и светочувствительный датчик, чувствительность которого регулировалась потенциометром.

Плотность тока при ЭХП образцов на постоянном токе составляла 0,5; 0,75 и 1,0 А/см². Более высокие значения плотности тока приводили к перегреву электролита и интенсивному пенообразованию, в результате чего возникала сложность сохранения постоянных условий обработки. Диаграммы и осциллограммы при обработке образцов в импульсных режимах представлены на рис. 3 и 4.

ЭХП образцов в униполярном режиме выполнялось при следующих характеристиках анодных импульсов:

- длительность импульсов: $\tau_a = 0,05; 0,5$ и 5 мс;
- период следования импульсов: $T = 0,1; 1$ и 10 мс;
- скважность импульсов $S = 2$;
- амплитудная плотность тока анодных импульсов: $i_a = 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$ и $1,5$ А/см².

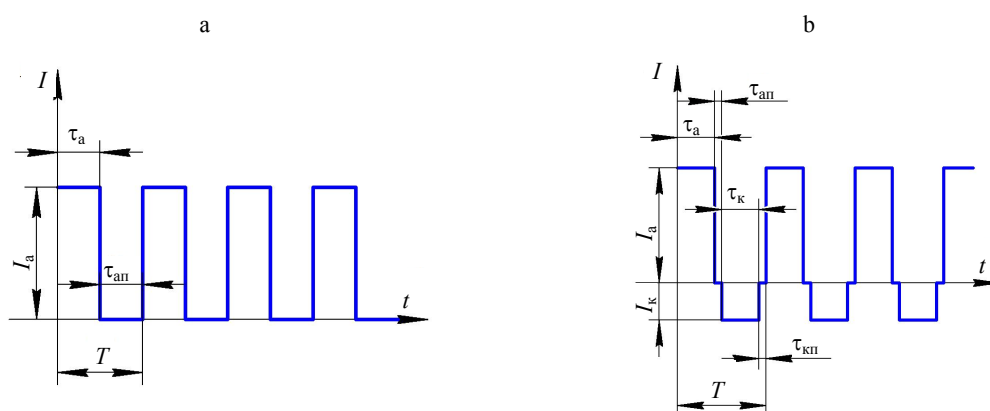


Рис. 3. Схемы импульсов при обработке образцов в режимах: а – униполярном; б – биполярном

Fig. 3. Schemes of pulses for sample processing in modes: a – unipolar; b – bipolar

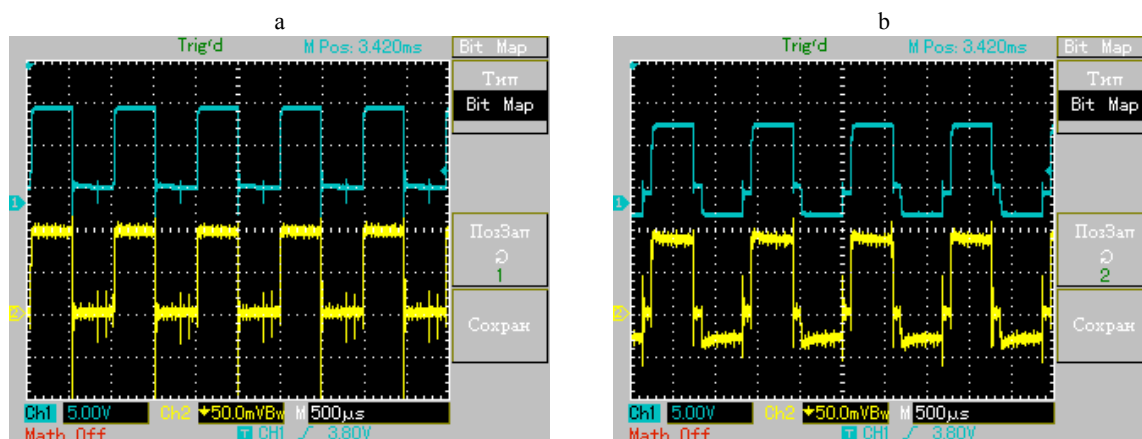


Рис. 4. Осциллограммы импульсов при обработке образцов в режимах: а – униполярном; б – биполярном
 Fig. 4. Oscillograms of pulses during sample processing in modes: a – unipolar; b – bipolar

Характеристики импульсов при обработке в биполярном режиме:

- длительность импульсов τ_a, τ_k : 0,05; 0,5 и 5 мс;
- длительность бестоковой паузы между анодным и катодным импульсами: $\tau_{ап} = \tau_{кп} = 0,2\tau_a$;
- период следования импульсов: $T = 0,12$; 1,2 и 12 мс;
- скважность анодных импульсов $S = 2,4$.

Для установления амплитуды отрицательного импульса, обеспечивающей максимальное изменение шероховатости поверхности в биполярном режиме, предварительно выполнялась обработка образцов с различным отношением амплитуд катодного и анодного импульсов I_k/I_a : 1/6; 1/4; 1/3; 5/12 и 1/2. Полученные зависимости влияния соотношения амплитуд отрицательного и положительного импульсов I_k/I_a в процессе биполярного ЭХП на изменение шероховатости поверхности образцов ΔR_a представлены на рис. 5.

Из зависимостей на рис. 5 видно, что максимальное повышение качества поверхности достигается при $I_k/I_a = 1/3$. При этом наилучший эффект наблюдается при длительности анодного и катодного импульсов 0,5 и 5 мс. Короткие импульсы ($\tau_a = \tau_k = 0,05$ мс) при выбранной плотности тока ($0,5 \text{ А/см}^2$) не обеспечивают значимого улучшения качества поверхности. Вероятно, в этом случае для исследуемого материала из-за недостаточной длительности импульсов на микровыступах обрабатываемой поверхности не создаются условия, необходимые для их активной поляризации. Таким образом,

в дальнейшем при обработке образцов в биполярном режиме использовалось соотношение амплитуд катодного и анодного импульсов $I_k/I_a = 1/3$.

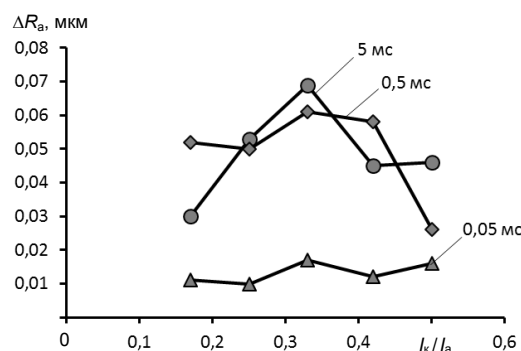


Рис. 5. Влияние соотношения амплитуд отрицательного и положительного импульсов в процессе биполярного электрохимического полирования на изменение шероховатости поверхности образцов при различных значениях длительности импульсов

Fig. 5. Influence of amplitude ratio for negative and positive pulses in the process of bipolar ECP on change of sample surface roughness at different values of pulse duration

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований влияния плотности тока на изменение шероховатости поверхности образцов при различных значениях длительности импульсов в униполярном и биполярном режимах ЭХП представлены на рис. 6. Для сравнения на графиках также приведены данные по изменению шероховатости поверхности образцов при обработке на постоянном токе.

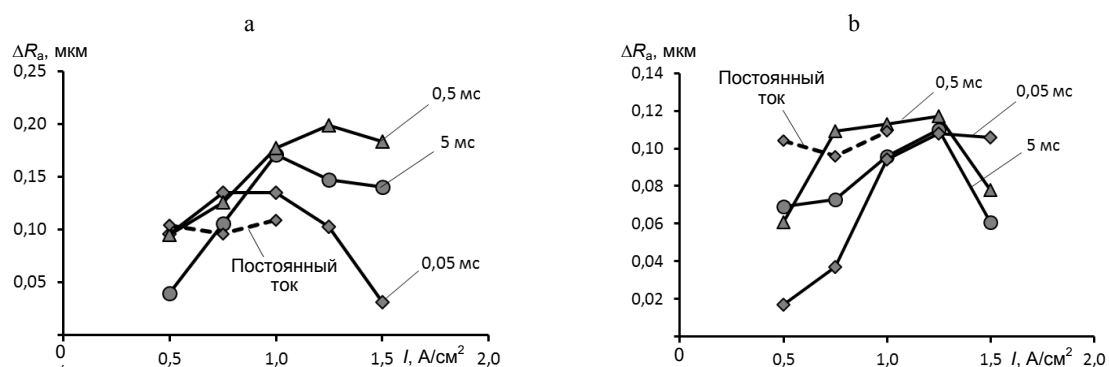


Рис. 6. Влияние плотности анодного тока на изменение шероховатости поверхности образцов при различных значениях длительности импульсов: а – положительные импульсы; б – биполярные импульсы

Fig. 6. Effect of anode current density on change of sample surface roughness at different values of pulse duration: a – positive pulses; b – bipolar pulses

Из результатов исследований видно, что наибольшее изменение шероховатости как при использовании униполярного, так и биполярного режимов достигается при длительности импульса 0,5 мс. Высокое качество обработки при такой длительности импульса обеспечивается, по-видимому, благодаря созданию наиболее благоприятных условий, при которых формируются соизмеримые и высокие скорости анодного растворения и пассивации поверхности, что позволяет полностью удалять продукты травления и восстанавливать концентрацию действующих компонентов в зоне обработки. Соответственно дальнейшие исследования импульсных режимов проводились при длительности анодных и катодных импульсов 0,5 мс. Униполярный режим обеспечивает значительно большее изменение шероховатости по сравнению с обработкой на постоянном токе (рис. 6а). Изменение шероховатости образцов, обработанных в биполярном режиме при плотности тока анодных импульсов 0,75–1,00 A/cm^2 , приблизительно соответствует изменению шероховатости при обработке на постоянном токе (рис. 6б).

Сравнение значений шероховатости поверхности R_a образцов после ЭХП с различными видами технологического тока показывает, что наиболее качественная обработка обеспечивается при использовании импульсного униполярного режима (рис. 7а). После ЭХП на импульсном униполярном режиме продолжительностью 3 мин максимальное изменение шероховатости ΔR_a составляет 0,199 μm при плотности тока 1,25 A/cm^2 , что значительно превышает величины ΔR_a , полученные для образцов после

обработки на постоянном токе (0,133 μm при $i = 1,0 \text{ A}/\text{cm}^2$) и в импульсном биполярном режиме (0,117 μm при $i_a = 1,25 \text{ A}/\text{cm}^2$). Однако, несмотря на низкую степень сглаживания микрорельефа, наибольшее повышение блеска поверхности (глянцевание) достигается для образцов, обработанных на постоянном токе (рис. 7б). Импульсный биполярный режим обеспечивает наименьший блеск поверхности. Съем металла при ЭХП на постоянном токе значительно выше, чем при обработке на импульсных режимах (рис. 7с). Например, при плотности тока 1,0 A/cm^2 в 2,2 раза больше, чем на импульсном униполярном режиме, и в 3,1 раза больше, чем на импульсном биполярном режиме.

Количественно эффективность ЭХП при использовании различных видов технологического тока оценивалась как отношение изменения шероховатости ΔR_a образца к изменению его массы Δm после обработки. Диаграмма, демонстрирующая влияние режимов электрохимического полирования на эффективность сглаживания микронеровностей, представлена на рис. 8. Из диаграммы видно, что эффективность при использовании импульсных режимов существенно выше, чем при обработке на постоянном токе. Наибольшие значения эффективности достигаются для биполярного импульсного режима при плотности тока 0,75 A/cm^2 и униполярного импульсного режима при плотности тока 1,0 A/cm^2 . Полученные для импульсных режимов значения в два раза превышают максимальную эффективность при использовании постоянного тока плотностью 0,5 A/cm^2 .

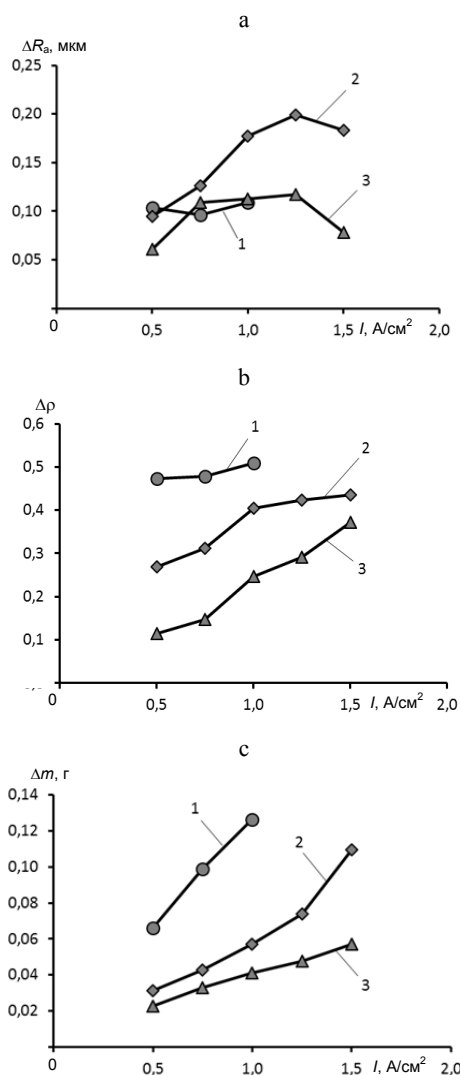


Рис. 7. Влияние плотности анодного тока на изменение шероховатости поверхности (а), блеска (b) и съема металла (с): 1 – постоянный ток; 2, 3 – униполярный и биполярный импульсы соответственно

Fig. 7. Effect of anode current density on surface roughness change (a), gloss change (b) and metal removal (c): 1 – direct current; 2, 3 – unipolar and bipolar pulses, respectively

Необходимо отметить, что хотя максимальное значение эффективности достигается для биполярного импульсного режима, однако при этом абсолютное изменение шероховатости существенно ниже, чем при использовании униполярного импульсного режима (рис. 7а).

Учитывая, что чрезмерный съем металла в операциях финишной обработки чаще всего является нежелательным, особенно при обработке точных деталей, изделий или деталей ма-

лого сечения и жесткости, очевидно, что для их обработки целесообразно использование именно импульсных режимов, которые при малом съеме металла обеспечивают существенное изменение шероховатости поверхности, т. е. имеют большую эффективность.

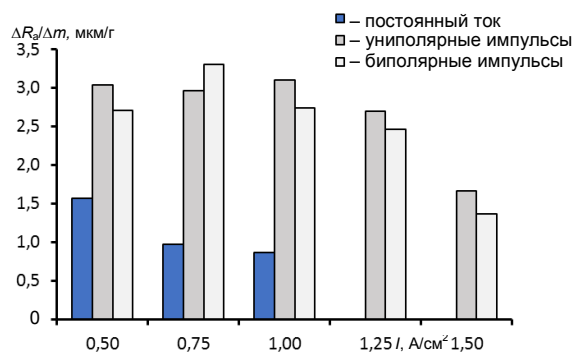


Рис. 8. Влияние режимов электрохимического полирования на эффективность сглаживания микронеровностей

Fig. 8. Effect of ECP modes on efficiency of micro-roughness smoothing

Энергетическая эффективность ЭХП с различными видами технологического тока определялась как отношение затраченной в процессе обработки электрической энергии к изменению параметра шероховатости ΔR_a на единицу обработанной поверхности

$$E = \frac{UIt}{\Delta R_a S}, \quad (1)$$

где U – напряжение обработки, В; I – сила тока, А; t – продолжительность обработки, с; S – площадь обрабатываемой поверхности, см^2 .

Значения рабочего напряжения в процессах ЭХП с различными видами технологического тока устанавливались экспериментально. Для импульсных режимов анодная плотность тока принималась равной $1,0 \text{ А/см}^2$, так как при этом значении обеспечиваются достаточно высокие показатели качества поверхности и высокая эффективность обработки. При обработке образцов площадью $9,0 \text{ см}^2$ для создания положительных импульсов тока амплитудой $9,0 \text{ А}$ рабочее напряжение составляло $9,9 \text{ В}$. Для создания отрицательного импульса амплитудой $3,0 \text{ А}$ в биполярном режиме требовалось напряжение $2,0 \text{ В}$. Поскольку при обработке на постоянном токе качество поверхности практически не зависит от плотности тока, для энергетических расчетов использовался режим, при котором обеспечивалась максималь-

ная эффективность обработки – плотность тока $0,5 \text{ A/cm}^2$ (сила тока $4,5 \text{ A}$). При этом необходимое напряжение обработки составляло $7,0 \text{ В}$.

При использовании постоянного тока энергия затрачивалась на протяжении всего периода обработки $t = 180 \text{ с}$. Для импульсных режимов продолжительность обработки принималась исходя из коэффициента заполнения, т. е. учитывалось только время действия токовых импульсов. Так, для униполярной обработки продолжительность t составила 90 с , а для биполярного режима время воздействия: анодных импульсов $t_a = 75 \text{ с}$, катодных $t_k = 75 \text{ с}$.

По результатам выполненных расчетов установлено, что наиболее эффективным является униполярный режим ЭХП. Энергетические затраты на процесс полирования в этом режиме на 13% меньше, чем при обработке на постоянном токе, и на 39% меньше, чем в биполярном импульсном режиме (рис. 9).

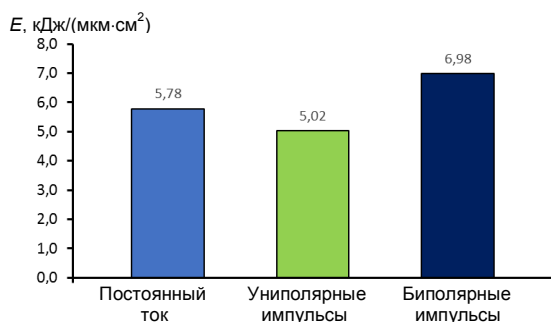


Рис. 9. Влияние вида технологического тока на энергетическую эффективность электрохимического полирования

Fig. 9. Effect of technological current type on energy efficiency of ECP

ВЫВОДЫ

1. По результатам выполненных исследований установлено, что наиболее качественное электрохимическое полирование поверхности обеспечивается при использовании импульсного униполярного режима с длительностью импульса $0,5 \text{ мс}$. После обработки продолжительностью 3 мин максимальное изменение шероховатости ΔR_a составляет $0,199 \text{ мкм}$ при плотности тока $1,25 \text{ A/cm}^2$, что значительно превышает значения ΔR_a , полученные для образцов после обработки на постоянном токе ($0,133 \text{ мкм}$ при $i = 1,0 \text{ A/cm}^2$) и в импульсном биполярном режиме ($0,117 \text{ мкм}$ при $i_a = 1,25 \text{ A/cm}^2$).

2. Применение импульсных режимов в процессе электрохимического полирования обеспечивает существенное снижение шерохо-

ватости поверхности при малом съеме металла. Так, наибольшие значения эффективности сглаживания микронеровностей, определяемой как отношение изменения шероховатости ΔR_a к съему металла Δm , достигаются для биполярного импульсного режима при плотности тока $i = 0,75 \text{ A/cm}^2$ и униполярного импульсного режима при анодной плотности тока $i_a = 1,0 \text{ A/cm}^2$. Полученные для импульсных режимов значения эффективности в два раза превышают максимальную эффективность (при $i = 0,5 \text{ A/cm}^2$) для традиционного электрохимического полирования с использованием постоянного тока. Соответственно наиболее целесообразно использование импульсных режимов для обработки точных деталей, изделий или деталей малого сечения и жесткости.

3. Энергетическая эффективность, определяемая как отношение затраченной в процессе обработки электрической энергии к изменению параметра шероховатости ΔR_a на единицу обработанной поверхности, на процесс электрохимического полирования в униполярном импульсном режиме на 13% меньше, чем при обработке на постоянном токе, и на 39% меньше, чем при обработке в биполярном импульсном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

- Bhat, S. V. Biomaterials / S. V. Bhat // Kluwer Academic Publishers. Boston: MA, USA, 2002. 265 p.
- Park, J. B. Biomaterials: An Introduction / J. B. Park, R. S. Lakes. 3rd ed. New York: Springer Link, 2007. 561 p.
- Witte, F. The History of Biodegradable Magnesium Implants: a Review / F. Witte // Acta Biomater. 2010. Vol. 6, No 5. P. 1680–1692. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2010.02.028>.
- Нержавеющая сталь в медицине [Электронный ресурс] // Никель. 2010. № 2. Режим доступа: <https://docplayer.ru/61467298-Nerzhavayushchaya-stal-sterilnyy-ustoychi-vyy-bezopasnyy-sistemy-ekranirovaniya-dlya-zashchity-bezopasnost-v-zdravoohranenii.html>.
- Сабитов, В. Х. Медицинские инструменты / В. Х. Сабитов. М.: Медицина, 1985. С. 21–31.
- Кириченко, В. Г. Металлография и металловедение сталей. 1. Сплавы и наноматериалы в ядерной энергетике / В. Г. Кириченко, С.В. Литовченко. Харьков: Харк. нац. ун-т имени В. Н. Каразина, 2012. С. 6–14.
- Newson, T. Stainless Steel – a Family of Medical Device Materials / T. Newson. London: World Markets Research Centre: Medical Device Manufacturing & Technology, 2002. 5 p.
- Ставышенко, А. С. Основные показатели качества поверхности деталей из нержавеющей стали после полирования электрохимическим способом: сб. науч. тр. / А. С. Ставышенко // Сборник научных трудов НГТУ. 2009. Т. 55, № 1. С. 51–56.
- Электролитно-плазменное полирование титановых и ниобиевых сплавов / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука

- и техника. 2018. Т. 17, № 3. С. 211–219. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-211-219>.
10. Электролитно-плазменная обработка при нестационарных режимах в условиях высокоградиентного электрического поля / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 5. С. 391–399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399>.
 11. Галанин, С. И. Электрохимическое полирование и глянецование поверхности ювелирных изделий с использованием импульсных токов – технология завтрашнего дня / С. И. Галанин, М. В. Сорокина, А. Ю. Токмаков // Русский ювелир. 2005. № 6. С. 113–116.
 12. Decnath, S. Investigation into Electrochemical Micromachining Process for Fabricating 3D-Fine Patterns in Air Lubricated Bearing / S. Decnath, S. Mahata // 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) December 12–14, 2014, IIT Guwahati, Assam, India. P. 231-1-231-6.
 13. Jeong-Woo Park. New Development of Combined Electrochemical Processes for Mirror Like Micro Grooves [Electronic Resource] / Jeong-Woo Park, Eun-Sang Lee, Young-Hun Moon. Mode of access: http://aspe.net/publications/Annual_2002/PDF/POSTERS/4proc/6polish/927.PDF.
 14. Park, J. W. Development of Electrochemical Micro Machining for Air-Lubricated Hydrodynamic Bearings / J. W. Park, E. S. Lee // *Microsystem Technologies*. 2002. Vol. 9, No 1–2. P. 61–66. <https://doi.org/10.1007/s00542-002-0184-8>.
 15. Galanin, S. I. Technological Features of Electrochemical Polishing of Gold Alloys by Pulse Currents / S. I. Galanin, I. V. Kalinnikov, A. S. Galanina // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2009. Vol. 45, No 2. P. 85–92. <https://doi.org/10.3103/s1068375509020021>.
 16. Taylor, E. J. Electrochemical Surface Finishing / E. J. Taylor, M. Inman // *Interface Magazine*. 2014. Vol. 23, No 3. P. 57–61. <https://doi.org/10.1149/2.f05143if>.
 17. Taylor, E. J. Adventures in Pulse/Pulse Reverse Electrolytic Processes: Explorations and Applications in Surface Finishing/ E. J. Taylor // *Plating and Surface Finishing*. 2008. Vol. 95, No 12. P. 25–35.
 18. Источник питания для исследования импульсных электрохимических процессов / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 3. С. 246–257. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-3-246-257>.
- Поступила 14.11.2018
Подписана в печать 19.02.2019
Опубликована онлайн 30.05.2019
- REFERENCES
1. Bhat S. V. (2002) *Biomaterials*. Springer, Dordrecht. 265. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0328-5>.
 2. Park J. B., Lakes R. S. (2007) *Biomaterials: An Introduction*. 3rd ed. New York: Springer Link. 561.
 3. Witte F. (2010) The History of Biodegradable Magnesium Implants: a Review. *Acta Biomaterialia*, 6 (5), 1680–1692. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2010.02.028>.
 4. Stainless Steel in Medicine. *Nickel*, 2010, (2). Available at: <https://docplayer.ru/61467298-Nerzhaveyushchaya-stal-sterilnyy-ustoychivyy-bezopasnyy-sistemy-ekranirovaniya-dlya-zashchity-bezopasnost-v-zdravoohraneni.html> (in Russian).
 5. Sabitov V. Kh. (1985) *Medical Instruments*. Moscow, Meditsina Publ., 21–31 (in Russian).
 6. Kirichenko V. G., Litovchenko S. V. (2012) *Metallography and Metallurgy of Steels. I. Alloys and Nanomaterials in Nuclear Power*. Kharkiv, V. N. Karazin. Kharkiv National University, 6–14 (in Russian).
 7. Newson T. (2002) *Stainless Steel – a Family of Medical Device Materials*. London, World Markets Research Centre: Medical Device Manufacturing & Technology. 5.
 8. Stavyschenko A. S. (2009) The Main Indicators of the Surface Quality of Parts Made of Stainless Steels after Electromechanical Polishing: Collection of Research Papers. *Sbornik Nauchnykh Trudov NGTU = Transaction of Scientific Papers of the Novosibirsk State Technical University*, 55 (1), 51–56 (in Russian).
 9. Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuto A. E., Budnitskiy A. S. (2018) Electrolyte-Plasma Polishing of Titanium and Niobium Alloys. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 17 (3), 211–219 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-211-219>.
 10. Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuto A. E. (2017) Electrolyte-Plasma Treatment under Non-Stationary Mode in High-Gradient Electric Field. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (5), 391–399 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399>.
 11. Galanin S. I., Sorokina M. V., Tokmakov A. Yu. (2005) Electrochemical Polishing and Surface Polishing of Jewelry Using Pulsed Current – Technology of Tomorrow. *Russkii Yuvelir* [Russian Jeweler], (6), 113–116 (in Russian).
 12. Decnath S., Mahata S. (2014) Investigation into Electrochemical Micromachining Process for Fabricating 3D-Fine Patterns in Air Lubricated Bearing. *5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) December 12–14, 2014*. IIT Guwahati, Assam, India, 231-1-231-6.
 13. Jeong-Woo Park, Eun-Sang Lee, Young-Hun Moon (2002) *New Development of Combined Electrochemical Processes for Mirror Like Micro Grooves*. Available at: http://aspe.net/publications/Annual_2002/PDF/POSTERS/4proc/6polish/927.PDF.
 14. Park J. W., Lee E. S. (2002) Development of Electrochemical Micro Machining for Air-Lubricated Hydrodynamic Bearings. *Microsystem Technologies*, 9 (1–2), 61–66. <https://doi.org/10.1007/s00542-002-0184-8>.
 15. Galanin S. I., Kalinnikov I. V., Galanina A. S. (2009) Technological Features of Electrochemical Polishing of Gold Alloys by Pulse Currents. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 45 (2), 85–92. <https://doi.org/10.3103/s1068375509020021>.
 16. Taylor E. J., Inman M. (2014) Electrochemical Surface Finishing. *Interface Magazine*, 23 (3), 57–61. <https://doi.org/10.1149/2.f05143if>.
 17. Taylor E. J. (2008) Adventures in Pulse/Pulse Reverse Electrolytic Processes: Explorations and Applications in Surface Finishing. *Plating and Surface Finishing*, 95 (12), 25–35.
 18. Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuto A. E., Soroka E. V., Budnitskiy A. S. (2018) Power Supply for the Investigation of Pulse Electrochemical Processes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obiedinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 246–257 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-61-3-246-257>.
- Received: 14.11.2018
Accepted: 19.02.2019
Published online: 30.05.2019