

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-1-39-47>
УДК 621.9.047.7



Оригинальная статья

А. Ю. Королёв^{1*}, В. А. Томило², В. С. Нисс²

¹*Научно-технологический парк БНТУ «Политехник», ул. Я. Коласа, 24, 220013,
Минск, Республика Беларусь*

²*Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013,
Минск, Республика Беларусь*

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ
В УПРАВЛЯЕМЫХ ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМАХ
ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ**

Аннотация. Для повышения эффективности электролитно-плазменной обработки разработаны режимы, основанные на использовании управляемых импульсов. Режимы реализуются путем чередования импульсов высокого напряжения, соответствующего электролитно-плазменной области, и бестоковых пауз между ними. Повышение эффективности импульсных режимов по сравнению с традиционной обработкой на постоянном токе достигается за счет интенсивного съема металла во время электрохимического процесса, протекающего в начальный момент включения импульса высокого напряжения (в стадии формирования парогазовой оболочки), и оптимизации продолжительности электролитно-плазменного процесса, при котором обеспечивается высокое качество поверхности. По результатам исследования влияния временных параметров управляемых импульсов на съем металла и качество формируемой поверхности установлены режимы, обеспечивающие высокую эффективность снижения шероховатости при низких энергетических затратах. Применение схемы, при которой управляемые импульсы высокого напряжения с длительностью 2–5 мс и амплитудой, соответствующей электролитно-плазменному процессу (300 В), чередуются с бестоковыми паузами длительностью 0,05 мс, обеспечивает существенное повышение интенсивности снижения шероховатости по сравнению с обработкой на постоянном токе. В результате для снижения шероховатости на величину, эквивалентную обработке на постоянном токе с продолжительностью 5 мин, общие затраты электроэнергии снижаются на 28–32 %. На основании полученных результатов разработаны и внедрены в производство энергоэффективные процессы импульсной электролитно-плазменной обработки для повышения качества поверхности и формообразования изделий медицинского и машиностроительного назначения из металлических материалов.

Ключевые слова: электролитно-плазменная обработка, импульсы, парогазовая оболочка, анодный процесс, плотность тока, шероховатость поверхности

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Королёв Александр Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент, заведующий научно-исследовательским сектором перспективных технологий Республиканского инновационного унитарного предприятия «Научно-технологический парк БНТУ “Политехник”», <https://orcid.org/0000-0002-0841-1272>, e-mail: korolyov@park.bntu.by; *Томило Вячеслав Анатольевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Машины и технология обработки металлов давлением» Белорусского национального технического университета, e-mail: stamila@gambler.ru; *Нисс Владимир Семенович* – кандидат технических наук, доцент, заведующий инновационно-производственным центром медицинского оборудования и изделий Белорусского национального технического университета, e-mail: niss@park.bntu.by

Вклад авторов: *Королёв Александр Юрьевич* – создание концепции, проведение экспериментов, интерпретация результатов исследования, работа с текстом рукописи; *Томило Вячеслав Анатольевич* – обобщение результатов исследования; *Нисс Владимир Семенович* – разработка дизайна экспериментального исследования.

Для цитирования: Королёв, А. Ю. Эффективность процессов повышения качества поверхности в управляемых импульсных режимах электролитно-плазменной обработки / А. Ю. Королёв, В. А. Томило, В. С. Нисс // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2026. – Т. 71, № 1. – С. 39–47. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-1-39-47>

Поступила в редакцию: 13.05.2025

Доработанный вариант: 16.02.2026

Утверждена к публикации: 05.03.2026

Подписана в печать: 12.03.2026

Original articleAleksandr Yu. Korolyov^{1*}, Vyacheslav A. Tomilo², Vladimir S. Niss²¹Scientific and Technological Park BNTU “Polytechnic”, 24, Ya. Kolas St., 220013,
Minsk, Republic of Belarus²Belarusian National Technical University, 65, Nezavisimosti Ave., 220013,
Minsk, Republic of Belarus**EFFICIENCY OF PROCESSES FOR INCREASING SURFACE QUALITY
IN CONTROLLED PULSE MODES OF ELECTROLYTE-PLASMA TREATMENT**

Abstract. To increase the efficiency of electrolyte-plasma treatment, modes based on the use of controlled pulses have been developed. The modes are implemented by alternating high-voltage pulses corresponding to the electrolytic-plasma area and current-free pauses between them. An increase in the efficiency of pulse modes compared to traditional direct current electrolyte-plasma treatment is achieved by intensive metal removal during the electrochemical process occurring at the initial moment of switching on the high-voltage pulse (at the stage of forming the vapor-gas shell) and optimization of the duration of the electrolyte-plasma process, which ensures high surface quality. Based on the results of studying the influence of time parameters of controlled pulses on metal removal and the quality of the formed surface, modes have been established that ensure high efficiency of roughness reduction at low energy costs. The use of a scheme in which controlled high-voltage pulses with a duration of 2–5 ms and an amplitude corresponding to the electrolytic-plasma area (300 V) alternate with current-free pauses of 50 μ s duration provides a significant increase in the intensity of roughness reduction compared to direct current treatment. As a result, for a roughness reduction by an amount equivalent to DC treatment with a duration of 5 min, the total energy costs are reduced by 28–32 %. Based on the results obtained, energy-efficient pulsed electrolytic-plasma treatment processes have been developed and implemented into production to improve the surface quality and shaping of medical and engineering products made from metallic materials.

Keywords: electrolytic-plasma processing, pulses, vapor-gas shell, anodic process, current density, surface roughness

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Aleksandr Yu. Korolyov* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Research Sector of Advanced Technologies at Republican Innovative Unitary Enterprise “Scientific and Technological Park BNTU “Polytechnic”, <https://orcid.org/0000-0002-0841-1272>, e-mail: korolyov@park.bntu.by; *Vyacheslav A. Tomilo* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Machines and Technology of Metal Forming at Belarusian National Technical University, e-mail: stamila@rambler.ru; *Vladimir S. Niss* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Innovation and Production Center for Medical Equipment and Products at Belarusian National Technical University, e-mail: niss@park.bntu.by

Contribution of the authors: *Aleksandr Yu. Korolyov* – concept development, conducting experiments, interpretation of research results, manuscript preparation; *Vyacheslav A. Tomilo* – synthesis of research results; *Vladimir S. Niss* – design of the experimental study.

For citation: Korolyov A. Yu., Tomilo V. A., Niss V. S. Efficiency of processes for increasing surface quality in controlled pulse modes of electrolyte-plasma treatment. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tehnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2026, vol. 71, no. 1, pp. 39–47 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2026-71-1-39-47>

Received: 13.05.2025

Modified: 16.02.2026

Approved for publication: 05.03.2026

Signed to the press: 12.03.2026

Введение. В качестве альтернативы электрохимическим методам повышения качества поверхности изделий из металлических материалов в промышленности широко применяется электролитно-плазменная обработка (ЭПО), к основному преимуществу которой относится использование электролитов на основе водных растворов солей. Одним из наиболее перспективных направлений метода является производство изделий медицинского назначения [1]. По результатам ранее проведенных исследований на основе ЭПО разработан и внедрен в производство ряд новых высокоэффективных процессов, которые обеспечивают повышение качества поверхности изделий, изготавливаемых из широкого перечня материалов, включая коррозионностойкие стали, титан и титановые сплавы, кобальтхромовые сплавы и нитинол [2–8]. Традиционно методы ЭПО реализуются в стационарных режимах с использованием постоянного тока (при напряжении около 300 В). Преимуществом стационарных режимов является возможность применения доступных и простых по конструкции источников технологического тока. Кроме того, процессы ЭПО постоянном токе хорошо изучены, на основании их исследований разработана теоретиче-

ская база, а результаты обработки, как правило, прогнозируемы, поддаются обоснованию и моделированию.

Общим недостатком рассматриваемого вида обработки является высокая энергоемкость, связанная прежде всего с необходимостью приложения высокого напряжения для формирования и поддержания устойчивой парогазовой оболочки в приэлектродной области. Ток, протекающий через парогазовую оболочку в процессе ЭПО, характеризуется сравнительно небольшой плотностью, что связано с ее высоким электрическим сопротивлением. При этом именно величина плотности тока выступает ключевым фактором, определяющим производительность процесса или съем металла с обрабатываемой поверхности. Следовательно, для повышения эффективности ЭПО (увеличения производительности и снижения энергопотребления) необходимо создать такие условия, при которых достигается повышенная плотность тока с низкими энергозатратами. При этом в этих условиях обработки должно сохраняться высокое качество формируемой поверхности.

Большой съем металла при относительно низком напряжении обеспечивается в электрохимической и коммутационной областях вольтамперной характеристики анодных процессов обработки в электролитах [9]. При этом значения напряжения, определяющие границы существования анодных процессов, зависят от тепловых и электрических условий, при которых они реализуются. При равных электрических параметрах эти границы зависят от электропроводящих свойств среды, которые в случае анодной обработки определяются составом и температурой применяемого электролита. Недостатком обработки в электрохимической и коммутационной областях, при условии применения в качестве электролитов водных растворов солей концентрацией 3–5 %, является низкое качество формируемой поверхности.

Высокое качество поверхности с большим съемом металла в случае одностадийной обработки может быть достигнуто при совмещении электрохимического и электролитно-плазменного процессов. Для этого необходимо создание электрических условий, при которых происходит возникновение нестационарных режимов, характеризующихся контролируемым кратковременным переходом из стационарного электролитно-плазменного процесса в электрохимический. В электрохимическом процессе обеспечивается интенсивный съем металла с низким энергопотреблением. Таким образом, за счет использования нестационарных режимов становится возможным осуществление комплексного электрохимического и электролитно-плазменного воздействия на обрабатываемую поверхность и создание эффективных процессов повышения качества поверхности.

Реализация указанных условий обеспечивается в управляемых импульсных режимах ЭПО (ИЭПО), основанных на чередовании импульсов высокого напряжения (в электролитно-плазменной области) и пауз между ними. Электрохимический процесс действует при включении импульса высокого напряжения (в стадии формирования парогазовой оболочки). Повышение эффективности ИЭПО по сравнению с обработкой на постоянном токе становится возможным за счет основного интенсивного съема металла при протекании электрохимического процесса и оптимизации продолжительности электролитно-плазменного процесса, при котором обеспечивается высокое качество поверхности. Соответственно, необходимая длительность и амплитуда импульсов должны приниматься из условий обеспечения высокого качества поверхности и высокой эффективности обработки, когда удельные энергозатраты на повышение качества поверхности ниже аналогичных значений, получаемых при традиционной ЭПО с применением постоянного тока.

Цель данной работы – исследование влияния параметров управляемых импульсов в процессе ИЭПО на качество формируемой поверхности, интенсивность съема металла и энергетические затраты, а также установление эффективных режимов, обеспечивающих повышение качества поверхности изделий из металлических материалов при снижении удельной энергоемкости.

Анодные процессы в управляемых импульсных режимах. На рис. 1 представлена диаграмма изменения плотности тока в пределах одного импульса с периодом следования T .

Управляемые импульсы высокого напряжения (ИВН) с длительностью $t_{\text{ИВН}}$ и амплитудой, соответствующей электролитно-плазменной области $U_{\text{ИВН}}$, чередуются с управляемыми по длительности бестоковыми паузами $t_{\text{П}}$. При этом период включает неуправляемый динамический

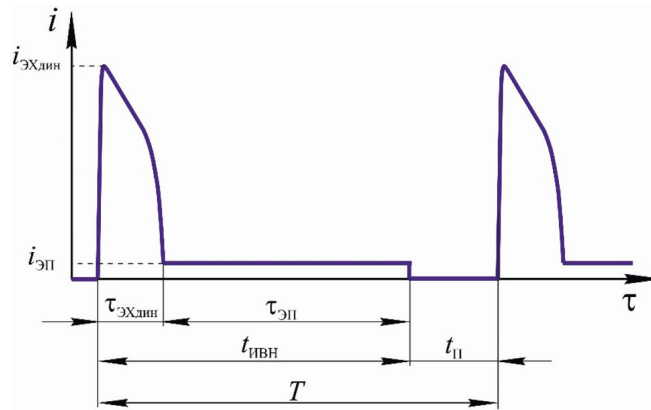


Рис. 1. Диаграмма изменения плотности тока в пределах периода

Fig. 1. Diagram of the change in current density within the period

электрохимический процесс длительностью $\tau_{\text{ЭХдин}}$ и электролитно-плазменный процесс длительностью $\tau_{\text{ЭП}}$. Неуправляемый динамический электрохимический процесс протекает при включении импульса высокого напряжения после бестоковой паузы и соответствует стадии формирования парогазовой оболочки (ПГО). Его длительность равна длительности стадии формирования парогазовой оболочки ($\tau_{\text{ЭХдин}} = \tau_{\text{ПГО}}$) и определяется параметрами электролитической системы (амплитуда напряжения, температура и концентрация электролита) [10]. При включении импульса высокого напряжения возникает интенсивный рост плотности тока до амплитудного значения $i_{\text{ЭХдин}}$ с последующим ее (плотности) снижением по мере образования парогазовой оболочки до значения $i_{\text{ЭП}}$, соответствующего электролитно-плазменному процессу. Длительность электролитно-плазменного процесса определяется как разность длительности импульса высокого напряжения и длительности динамического электрохимического процесса (или стадии формирования парогазовой оболочки):

$$\tau_{\text{ЭП}} = t_{\text{ИВН}} - \tau_{\text{ЭХдин}} \quad (1)$$

После отключения импульса высокого напряжения действует бестоковая пауза, в зависимости от длительности которой, происходит полная или частичная конденсация парогазовой оболочки с возникновением контакта анода и электролита.

Очевидно, что в повторяющемся импульсном режиме длительность и амплитуда тока динамической электрохимической стадии и, соответственно, основной съем металла будут определяться динамикой чередования электрохимического и электролитно-плазменного процессов, то есть частотой следования импульсов. Чем выше частота, тем чаще в единицу времени возникает динамический электрохимический процесс с высокой плотностью тока. Таким образом, имеет место комплексное влияние временных и амплитудных параметров управляемых импульсов, что указывает на необходимость дальнейшего уточнения их взаимосвязей, а также их влияния на съем металла и качество формируемой поверхности на основе результатов экспериментальных исследований.

Оборудование и методы. Для выполнения исследований использовался источник питания мощностью 12 кВт с двумя независимыми выходами, позволяющими регулировать напряжение от 0 до 500 В, и мощный электронный ключ, обеспечивающий возможность формирования импульсов заданной длительности [11].

На рис. 2 представлена принципиальная схема источника питания. Основным элементом схемы является ключ на транзисторе IGBT типа MIAA-HB12MA-200N с максимальным напряжением исток-сток 1200 В и током стока 200 А. Для выполнения исследований разработан и изготовлен генератор, позволяющий формировать управляющие импульсы длительностью от 0,05 мс с коэффициентом заполнения 5–95 %. Диод предназначен для подключения нижнего (по схеме) источника в момент запирающего транзистора от генератора импульсов и отключения верхнего (по схеме) источника питания от нагрузки обрабатываемого образца.

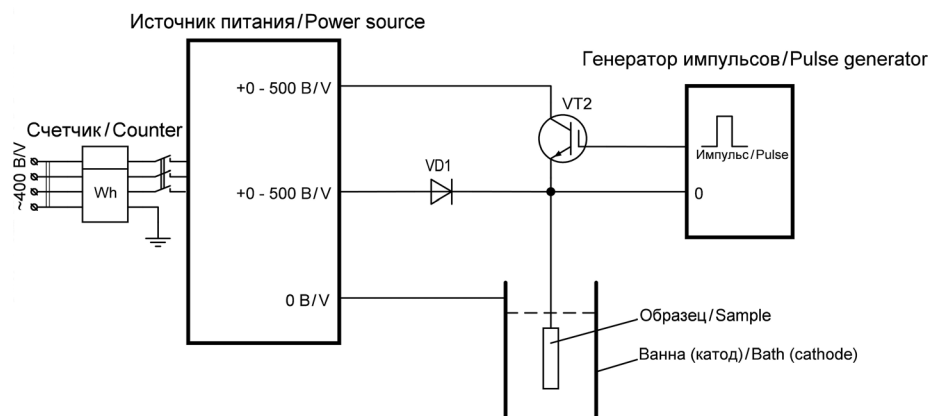


Рис. 2. Схема оборудования для исследования электролитно-плазменной обработки в управляемых импульсных режимах

Fig. 2. Scheme of equipment for studying on electrolytic plasma processing in controlled pulse modes

В качестве образцов для исследований использовались пластины размером $25 \times 5 \times 1$ мм из стали 08X18N10 (ГОСТ 5632–2014). Образцы предварительно шлифовались абразивным материалом на войлочной основе с зернистостью P320–P400. Для измерения шероховатости поверхности использовался профилометр MarSurf PS1 (Германия). Среднее значение шероховатости исходных образцов составило $Ra = 0,212$ мкм. Масса образцов до и после обработки измерялась на аналитических весах OHAUS Pioneer PA 214C (Китай) с дискретностью 0,1 мг. Съём металла (Δm) рассчитывался по формуле

$$\Delta m = \frac{m_{\text{исх}} - m_{\text{кон}}}{m_{\text{исх}}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где $m_{\text{исх}}$ – масса образца до обработки, г; $m_{\text{кон}}$ – масса образца после обработки, г.

Для измерения электроэнергии, затрачиваемой на процесс ИЭПО, использовался трехфазный электросчетчик «Меркурий 231» ART-01ш (Россия) с дискретностью 0,01 кВт·ч, подключенный перед входом источника питания.

Оценка эффективности применения ИЭПО для повышения качества поверхности выполнялась по величине электроэнергии, затрачиваемой на уменьшение микронеровностей на единицу высоты $E_{\Delta Ra}$ (3):

$$E_{\Delta Ra} = \frac{Q_3}{\Delta Ra}, \quad (3)$$

где Q_3 – расход электроэнергии за время обработки исследуемых образцов (3 мин), кВт·ч; ΔRa – изменение шероховатости, мкм.

Результаты и их обсуждение. Зависимости съема металла и изменения шероховатости поверхности от длительности $t_{\text{ИВН}}$ в диапазоне от 0,05 до 10 мс, в котором наблюдаются наиболее значимые изменения исследуемых параметров, представлены на рис. 3. Значения $t_{\text{ИВН}}$ приняты из ряда 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5 и 10 мс. Исследования проведены при температуре электролита 80 и 90 °С.

Видно, что полученные зависимости для каждого из значений температуры имеют схожий характер. В начале с увеличением длительности импульса высокого напряжения до $t_{\text{ИВН}} = 0,5$ мс наблюдается повышение съема металла до следующих максимальных значений: при температуре 80 °С – $\Delta m = 5,3$ % и при температуре 90 °С – $\Delta m = 2,0$ %. Далее следует плавное снижение величины съема (см. рис. 3, а). В диапазоне длительности импульса высокого напряжения $t_{\text{ИВН}} = 0,05$ –1,0 мс показатели качества поверхности имеют близкие значения. При дальнейшем увеличении длительности импульса высокого напряжения значения изменения шероховатости, достигаемые при температуре электролита 80 °С, снижаются по сравнению с показателями при температуре 90 °С (см. рис. 3, б).

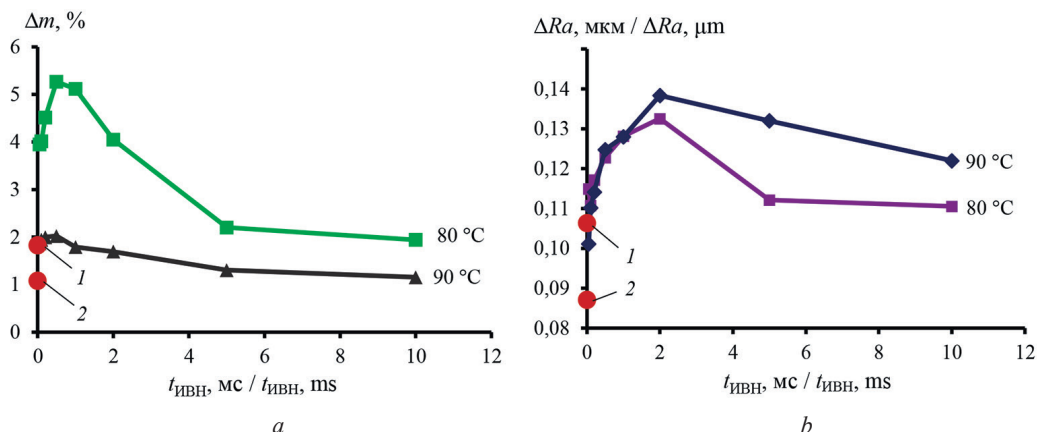


Рис. 3. Влияние длительности импульса высокого напряжения на изменение съема металла (a) и шероховатости (b); 1 – обработка на постоянном токе при температуре электролита 80 °С; 2 – обработка на постоянном токе при температуре электролита 90 °С

Fig. 3. Effect of high voltage pulse duration on changes in metal removal (a) and roughness (b); 1 – direct current treatment at an electrolyte temperature of 80 °C; 2 – direct current treatment at an electrolyte temperature of 90 °C

Для расчета значений коэффициента эффективности ИЭПО $E_{\Delta Ra}$, позволяющего оценить целесообразность применения в процессах полирования, установлено влияние длительности импульса высокого напряжения на расход электроэнергии (Q_3) за время обработки исследуемых образцов (рис. 4). Полученные зависимости хорошо коррелируют с зависимостями съема металла от длительности импульса высокого напряжения (см. рис. 3, a).

Значения коэффициента эффективности $E_{\Delta Ra}$ в зависимости от длительности импульса высокого напряжения в диапазоне от 1 до 10 мс, в котором обеспечиваются высокие показатели качества формируемой поверхности, представлены на рис. 5. В целом энергозатраты на процесс ИЭПО выше, чем при обработке на постоянном токе. Однако при температуре электролита 90 °С и длительности импульса высокого напряжения 5 и 10 мс обеспечивается снижение коэффициента $E_{\Delta Ra}$ соответственно на 5 и 8 % по сравнению с обработкой на постоянном токе.

Таким образом, процессы повышения качества поверхности на основе ИЭПО целесообразно выполнять при более высоком значении температуры электролита. Кроме того, с учетом большего съема металла в импульсном режиме можно добиться уменьшения продолжительности обработки, и, соответственно, общих энергозатрат на процессы снижения шероховатости до тре-

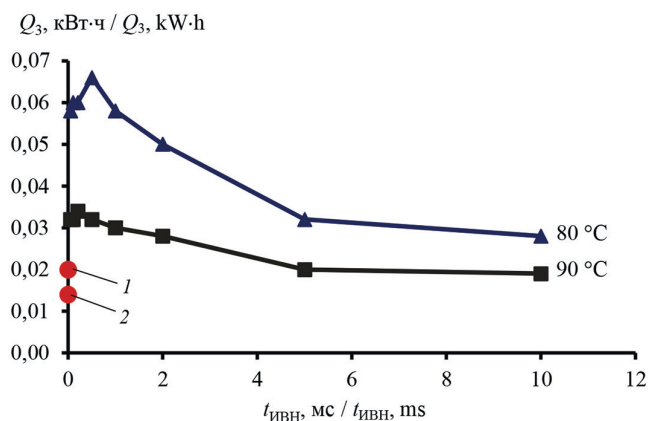


Рис. 4. Влияние длительности импульса высокого напряжения на расход электроэнергии; 1 – обработка на постоянном токе при температуре электролита 80 °С; 2 – обработка на постоянном токе при температуре электролита 90 °С

Fig. 4. Effect of high voltage pulse duration on energy consumption during sample processing; 1 – direct current treatment at an electrolyte temperature of 80 °C; 2 – direct current treatment at an electrolyte temperature of 90 °C

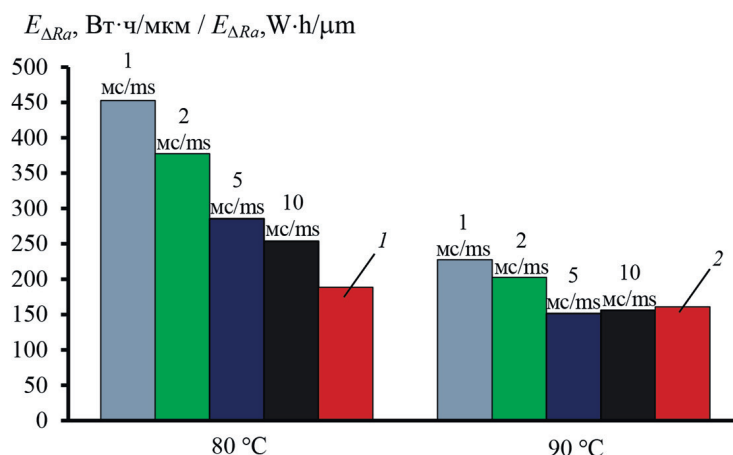


Рис. 5. Влияние температуры электролита и длительности импульса высокого напряжения на коэффициент эффективности обработки $E_{\Delta Ra}$; 1 – обработка на постоянном токе при температуре электролита 80 °C; 2 – обработка на постоянном токе при температуре электролита 90 °C
 Fig. 5. Effect of electrolyte temperature and high voltage pulse duration on the processing efficiency coefficient $E_{\Delta Ra}$; 1 – direct current treatment at an electrolyte temperature of 80 °C; 2 – direct current treatment at an electrolyte temperature of 90 °C

буемого значения. Поэтому с целью оценки общей энергоэффективности таких процессов нами дополнительно исследовалась динамика изменения шероховатости поверхности при ИЭПО. Для этого выполнялась обработка образцов с продолжительностью до 10 мин (0,5; 1; 2; 3; 5; 7,5; 10 мин) в импульсном режиме с длительностью импульсов высокого напряжения 1, 2, 5 и 10 мс при амплитуде 300 В, а также на постоянном токе при напряжении 300 В. Образцы обрабатывались в электролите с концентрацией 4 % при температуре 90 °C.

Установлено, что зависимости съема металла от продолжительности обработки имеют линейный характер (рис. 6, а). На графике выделяются импульсные режимы с длительностью ИВН 1 и 2 мс, при которых съем металла в среднем в 1,4 раза выше, чем при других импульсных

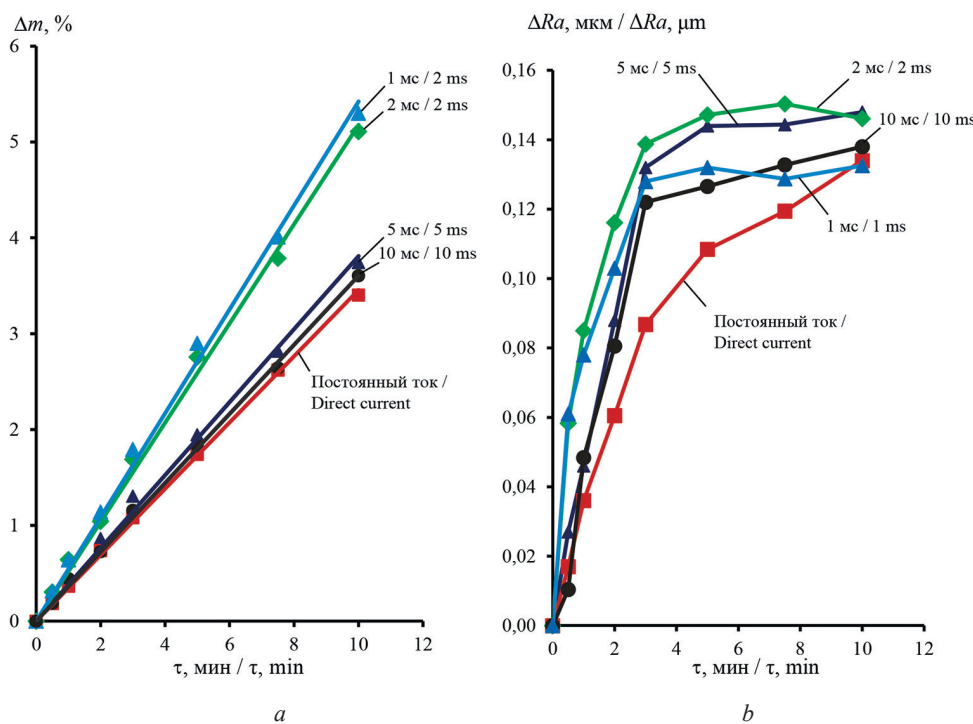


Рис. 6. Влияние продолжительности обработки на изменение съема металла (а) и шероховатости (b)
 Fig. 6. Effect of processing duration on changes in metal removal (a) and roughness (b)

режимах. Это связано с большой составляющей электрохимического тока в пределах периода. При увеличении длительности импульсов высокого напряжения до 5 и 10 мс съём металла близок к значению, получаемому при постоянном токе.

Для исследуемых импульсных режимов по сравнению с режимом, основанным на применении постоянного тока, характер динамики изменения шероховатости в процессе обработки значительно отличается (рис. 6, *b*). Так, в импульсных режимах наиболее существенное изменение шероховатости отмечается при обработке продолжительностью до 3 мин. Причем максимальная интенсивность наблюдается для режимов с длительностью импульса высокого напряжения 1 и 2 мс, при которых обеспечивается наибольший съём металла.

С дальнейшим увеличением продолжительности обработки параметр Ra изменяется незначительно. При обработке на постоянном токе с возрастанием продолжительности происходит более плавное изменение шероховатости. В результате обработка в импульсных режимах с продолжительностью 3 мин обеспечивает величину изменения шероховатости ($\Delta Ra = 0,122\text{--}0,138$ мкм), сопоставимую с ΔRa при обработке на постоянном токе продолжительностью 10 мин ($\Delta Ra = 0,134$ мкм). При этом максимальное изменение шероховатости в импульсных режимах достигается при длительности импульса высокого напряжения 2 и 5 мс. При меньших значениях $t_{\text{ИВН}}$ на состояние формируемой поверхности начинает оказывать влияние электрохимическая составляющая тока, а при больших значениях проявляется тенденция к возникновению условий обработки, близких к ЭПО на постоянном токе.

Сопоставление данных о расходе электроэнергии (см. рис. 5) и данных о динамике изменения шероховатости (см. рис. 6, *b*) показывает, что применение импульсных режимов позволяет существенно снизить энергетические затраты на повышение качества поверхности. Так, для снижения шероховатости на величину, которая обеспечивается при обработке на постоянном токе с продолжительностью 5 мин ($\Delta Ra = 0,108$ мкм), затраты электроэнергии ниже: при $t_{\text{ИВН}} = 2$ мс – на 28 %, а при $t_{\text{ИВН}} = 5$ мс – на 32 %. Для случая, когда требуется снижение шероховатости на величину, сопоставимую с изменением шероховатости при обработке на постоянном токе продолжительностью 10 мин ($\Delta Ra = 0,134$ мкм), эти показатели увеличиваются соответственно до 53 и 46 %.

Заключение. Разработаны импульсные режимы, позволяющие повысить эффективность процессов электролитно-плазменной обработки. За счет применения управляемых импульсов обеспечиваются условия для комплексного электрохимического и электролитно-плазменного воздействия на обрабатываемую поверхность. Электрохимический процесс действует в начальной стадии импульса высокого напряжения, амплитуда которого соответствует электролитно-плазменной области (в момент образования парогазовой оболочки). Повышение эффективности ИЭПО по сравнению с обработкой на постоянном токе становится возможным за счет основного интенсивного съема металла при протекании электрохимического процесса и оптимизации продолжительности электролитно-плазменного процесса, при котором обеспечивается высокое качество поверхности. Управление динамикой анодных и тепловых процессов в процессе ИЭПО осуществляется путем регулирования периода, амплитуды и длительности импульсов.

Применение схемы, при которой управляемые импульсы высокого напряжения с длительностью $t_{\text{ИВН}} = 2\text{--}5$ мс и амплитудой, соответствующей электролитно-плазменной области (300 В), чередуются с управляемыми бестоковыми паузами длительностью 0,05 мс, за счет протекания неуправляемого динамического электрохимического процесса в начальной стадии импульса высокого напряжения обеспечивает существенное повышение интенсивности снижения шероховатости по сравнению с обработкой на постоянном токе. В результате для снижения шероховатости на величину, эквивалентную обработке на постоянном токе с продолжительностью 5 мин, общие затраты электроэнергии уменьшаются на 28–32 %, а для случая, когда требуется снижение шероховатости на величину, сопоставимую с изменением шероховатости при обработке на постоянном токе продолжительностью 10 мин, уменьшение энергозатрат составляет 46–53 %.

Практическим результатом выполненных исследований является разработка на их основе и внедрение в производство энергоэффективных процессов ИЭПО для повышения качества поверхности и формообразования изделий медицинского назначения и изделий машиностроения из металлических материалов.

Список использованных источников

1. Королёв, А. Ю. Электролитно-плазменное полирование металлических материалов медицинского назначения / А. Ю. Королёв, В. А. Томило // Актуальные проблемы прочности: материалы LXVIII междунар. науч. конф., Витебск, 27–31 мая 2024 г. / под ред. В. В. Рубаника. – Мн.: УП «ИВЦ Минфина», 2024. – С. 328–330.
2. Куликов, И. С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И. С. Куликов, С. В. Ващенко, А. Я. Каменев. – Мн.: Бел. наука, 2010. – 232 с.
3. Смыслов, А. М. Многоэтапная электролитно-плазменная обработка изделий из титана и титановых сплавов / А. М. Смыслов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2009. – Т. 13, № 1. – С. 141–145.
4. Plasma Electrolytic Polishing of Nitinol: Investigation of Functional Properties / K. Navickaitė, L. Ianniciello, J. Tušek [et al.] // *Materials*. – 2021. – Vol. 14, № 21. – Art. ID 6450. <https://doi.org/10.3390/ma14216450>
5. Алексеев, Ю. Г. Электролитно-плазменное полирование кобальт-хромовых сплавов медицинского назначения / Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королёв, В. С. Нисс // Вестні Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2019. – Т. 64, № 3. – С. 296–303. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-296-303>
6. Plasma Electrolyte Polishing of Titanium and Niobium Alloys in Low Concentrated Salt Solution Based Electrolyte / Y. Aliakseyeu, A. Bubulis, A. Korolyov [et al.] // *Mechanika*. – 2021. – Vol. 27, № 1. – P. 88–93. <https://doi.org/10.5755/j02.mech.25044>
7. Electrolytic plasma polishing of NiTi alloy. Mathematical models in engineering / A. Korolyov, A. Bubulis, J. Vėžys [et al.] // *JVE international*. – 2021. – Vol. 7, № 4. – P. 70–80. <https://doi.org/10.21595/mme.2021.22351>
8. Электроимпульсное полирование сплавов на основе железа, хрома и никеля / Ю. В. Синькевич, В. К. Шелег, И. Н. Янковский, Г. Я. Беляев. – Мн.: БНТУ, 2014. – 325 с.
9. Королёв, А. Ю. Влияние анодных режимов обработки в электролитах на съём металла и выход по току / А. Ю. Королёв // Наука и техника. – 2025. – Т. 24, № 2. – С. 109–117. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-109-117>
10. Королёв, А. Ю. Энергетические характеристики стадии формирования парогазовой оболочки при электролитно-плазменной обработке / А. Ю. Королёв, В. А. Томило, В. С. Нисс // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2024. – Т. 68, № 4. – С. 344–352. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-4-344-352>
11. Источник питания для исследования импульсных электрохимических процессов / Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королёв, В. С. Нисс [и др.] // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2018. – № 3. – С. 246–257. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-61-3-246-257>

References

1. Korolyov A. Yu., Tomilo V. A. Electrolytic plasma polishing of metallic materials for medical applications. Rubanik V. V., ed. *Aktual'nye problemy prochnosti: materialy LXVIII mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Vitebsk, 27–31 maya 2024 g.* [Actual problems of strength: Proceedings of the LXVIII International Scientific Conference, Vitebsk, May 27–31, 2024]. Minsk, UE “IVC of the Ministry of Finance”, 2024, pp. 328–330 (in Russian).
2. Kulikov I. S., Vashchenko S. V., Kamenev A. Ya. *Electrolyte-Plasma Treatment of Materials*. Minsk, Belaruskaya nauka Publ., 2010. 232 p. (in Russian).
3. Smyslov A. M. Multistage electrolytic plasma treatment of titanium and titanium alloy products. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Ufa State Aviation Technical University*, 2009, vol. 13, no. 1, pp. 141–145 (in Russian).
4. Navickaitė K., Ianniciello L., Tušek J., Engelbrecht K., Bahl C. R. H., Penzel M., Nestler K., Böttger-Hiller F., Zeidler H. Plasma Electrolytic Polishing of Nitinol: Investigation of Functional Properties. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 21, art. ID 6450. <https://doi.org/10.3390/ma14216450>
5. Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S. Electrolytic-plasma polishing of cobalt-chromium alloys for medical products. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 296–303 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-296-303>
6. Aliakseyeu Y., Bubulis A., Korolyov A., Niss V., Kandrotaitė Janutienė R. Plasma Electrolyte Polishing of Titanium and Niobium Alloys in Low Concentrated Salt Solution Based Electrolyte. *Mechanika*, 2021, vol. 27, no. 1, pp. 88–93. <https://doi.org/10.5755/j02.mech.25044>
7. Korolyov A., Bubulis A., Vėžys J., Aliakseyeu Yu., Minchenya V., Niss V., Markin D. Electrolytic plasma polishing of NiTi alloy. Mathematical models in engineering. *JVE International*, 2021, vol. 7, iss. 4, pp. 70–80. <https://doi.org/10.21595/mme.2021.22351>
8. Sin'kevich Yu. V., Sheleg V. K., Yankovskii I. N., Belyaev G. Ya. *Electropulse Polishing of Alloys Based on Iron, Chromium and Nickel*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2014. 325 p. (in Russian).
9. Korolyov A. Yu. Effect of anodic treatment modes in electrolytes on metal removal and current efficiency. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*, 2025, vol. 24, no. 2, pp. 109–117 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-109-117>
10. Korolyov A. Yu., Tomilo V. A., Niss V. S. Energy characteristics of the vapor-gas shell formation stage during electrolyte-plasma treatment. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2024, vol. 68, no. 4, pp. 344–352 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-4-344-352>
11. Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuto A. E., Soroka E. V., Budnitskiy A. S. Power supply for the investigation of Pulse Electrochemical Processes. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2018, vol. 61, no. 3, pp. 246–257 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-61-3-246-257>