
МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING
AND ENGINEERING SCIENCE

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-279-286>

УДК 621.9.047.7

Электролитно-плазменная обработка в управляемых импульсных режимах

Кандидаты техн. наук, доценты А. Ю. Королёв¹⁾, Ю. Г. Алексеев¹⁾, В. С. Нисс¹⁾,
инж. А. Э. Паршута¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Электролитно-плазменная обработка (ЭПО) получила широкое распространение в промышленности в качестве альтернативы традиционным химическим, электрохимическим и механическим методам повышения качества поверхности изделий из металлических материалов. Преимуществами ЭПО являются высокая интенсивность сглаживания микронеровностей, применение в качестве электролитов растворов солей низкой концентрации, возможность обработки изделий сложной формы. Основным недостатком метода – высокая энергоёмкость, поэтому его можно отнести к энергоёмкому производству. Для снижения энергоёмкости и повышения эффективности процесса ЭПО металлических материалов при сохранении его высокой интенсивности, качества обработки и экологической безопасности предлагается принципиально новый импульсный метод (импульсная ЭПО), совмещающий преимущества как электрохимической обработки, так и ЭПО. Метод реализуется за счет совмещения в пределах одного импульса миллисекундной длительности двух чередующихся стадий: электрохимической и электролитно-плазменной. Высокая эффективность разработанного метода достигается за счет основного интенсивного съема металла при реализации электрохимической стадии с большой плотностью тока и оптимизации продолжительности электролитно-плазменной стадии, при которой обеспечивается высокое качество поверхности. Уменьшение периода следования импульсов при снижении их длительности позволяет увеличить электрохимическую составляющую процесса и обеспечить более интенсивный съем металла, удалить значительные неровности поверхности. Увеличение периода следования импульсов при одновременном повышении их длительности позволяет увеличить электролитно-плазменную составляющую процесса и достигнуть низкой шероховатости при общем снижении энергоёмкости процесса. В результате выполнения работы исследовано влияние импульсных характеристик разработанного процесса, концентрации и температуры электролита на плотность тока и длительность электрохимической и электролитно-плазменной стадий, произведен сравнительный анализ эффективности использования импульсного процесса ЭПО вместо традиционного процесса на постоянном напряжении. Установлено, что скорость съема металла в данном импульсном процессе более чем в пять раз превышает скорость съема в процессе, основанном на применении постоянного напряжения, и составляет 40 мкм/мин. При этом энергетические затраты на реализацию импульсного процесса на 19 % меньше.

Ключевые слова: импульсы, электролитно-плазменная обработка, электрохимическая обработка, плотность тока, паргазовая оболочка, поверхность, съем металла

Для цитирования: Электролитно-плазменная обработка в управляемых импульсных режимах / А. Ю. Королёв [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 4. С. 279–286. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-279-286>

Electrolyte-Plasma Treatment in Controlled Pulse Modes

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

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

Abstract. Electrolyte-plasma treatment (EPT) has become widespread in industry as an alternative to traditional chemical, electrochemical and mechanical methods of improving the surface quality of products made of metallic materials.

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

The advantages of EPT are a high intensity of smoothing of microroughnesses, the use of low-concentration salt solutions as electrolytes, and the ability to process items of complex shape. The main disadvantage of the method is its high energy consumption; therefore, the method can be classified as energy-intensive production. To reduce the energy intensity and increase the efficiency of the EPT process of metallic materials while maintaining high intensity, processing quality and environmental safety, we proposed a fundamentally new pulse method (pulsed EPT), which combines the advantages of both electrochemical processing and EPT. The method is realized by combining two alternating stages within one millisecond pulse: electrochemical and electrolyte-plasma. The high efficiency of the developed method is achieved due to the main intensive metal removal during the implementation of the electrochemical stage with a high current density and optimization of the duration of the electrolyte-plasma stage, which provides a high surface quality. A decrease in the repetition period of pulses with a decrease in their duration makes it possible to increase the electrochemical component of the process and to provide a more intensive metal removal, to remove significant surface irregularities. An increase in the pulse repetition period with a simultaneous increase in their duration permits to increase the electrolyte-plasma component of the process and achieve a low roughness with a general decrease in the energy intensity of the process. As a result of the work, the influence of the pulse characteristics of the developed process, the concentration and temperature of the electrolyte on the current density and the duration of the electrochemical and electrolyte-plasma stages has been investigated, a comparative analysis of the efficiency of using the pulsed EPT process instead of the traditional process at constant voltage has been carried out. It has been found that the metal removal rate in the developed pulse process is more than five times higher than the removal rate in the process based on the use of constant voltage, and is 40 $\mu\text{m}/\text{min}$, while the energy costs for the implementation of the pulse process is 19 % less.

Keywords: pulses, electrolytic-plasma treatment, electrochemical treatment, current density, vapor-gas shell, surface, metal removal

For citation: Korolyov A. Yu., Aliakseyeu Yu. G., Niss V. S., Parshuto A. E. (2021) Electrolyte-Plasma Treatment in Controlled Pulse Modes. *Science and Technique*. 20 (4), 279–286. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-279-286> (in Russian)

Введение

Одним из прогрессивных методов повышения качества поверхности металлических изделий является электролитно-плазменная обработка (ЭПО), которая широко используется для полирования, удаления заусенцев и очистки изделий медицинского назначения, декоративных изделий, деталей машин и приборов, а также для повышения физико-механических и химических свойств поверхности [1–3], подготовки поверхности к нанесению покрытий [4]. Другими направлениями применения технологии ЭПО являются: размерная обработка ответственных длинномерных изделий [5–7], полирование и очистка внутренних поверхностей длинномерных трубчатых изделий [8], обработка поверхности с целью удаления инородных включений и снижения плотности дислокаций [9, 10].

ЭПО имеет ряд существенных преимуществ перед традиционными методами механического, электрохимического и химического полирования:

- возможность получения зеркальной поверхности с высотой микронеровностей до $Ra = 0,01$ мкм;
- высокую экологическую безопасность по сравнению с классическим электрохимическим полированием за счет применения электролитов на основе водных растворов солей с низкой концентрацией [11];

– повышенную коррозионную стойкость поверхности;

– возможность обработки деталей и изделий сложной формы [2, 11, 12].

Основным недостатком метода является высокая энергоемкость. Плотность мощности в процессе обработки может достигать $300 \text{ Вт}/\text{см}^2$, поэтому метод в его классическом виде можно отнести к энергоемкому производству [13]. Для снижения энергоемкости и повышения эффективности процесса ЭПО металлических материалов при сохранении его высокой интенсивности, качества обработки и экологической безопасности авторами предложен принципиально новый импульсный метод (импульсная ЭПО), совмещающий преимущества как электрохимической обработки, так и ЭПО. Метод реализуется за счет совмещения в пределах одного импульса миллисекундной длительности с амплитудой по напряжению более 90 В двух чередующихся стадий: электрохимической и электролитно-плазменной (рис. 1). На осциллограмме рис. 1а видно, что во время электрохимической стадии при увеличении напряжения происходит значительный рост силы тока, а при достижении определенного значения напряжения возникает электролитно-плазменная стадия, во время которой протекает высокочастотный ток намного меньшей амплитуды.

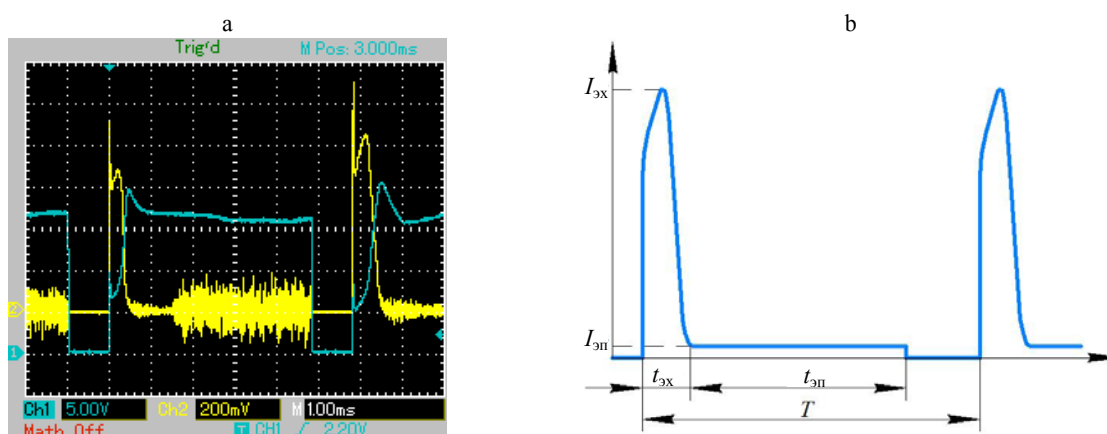


Рис. 1. Импульсные характеристики процесса:

a – осциллограммы напряжения (зеленая линия) и тока (желтая линия); b – диаграмма импульсов тока

Fig. 1. Pulse characteristics of process:

a – oscillograms of voltage (green line) and current (yellow line); b – diagram of current pulses

На рис. 1b представлена диаграмма изменения силы тока в пределах одного импульса с периодом следования T . Высокая эффективность достигается за счет основного интенсивного съема металла при реализации электрохимической стадии длительностью $t_{эx}$ с высоким значением силы тока $I_{эx}$ и оптимизации продолжительности электролитно-плазменной стадии $t_{эп}$, при которой обеспечивается высокое качество поверхности. Уменьшение периода следования импульсов T при снижении их длительности позволяет увеличить электрохимическую составляющую процесса и обеспечить более интенсивный съем металла, удалить значительные неровности поверхности. Увеличение периода следования импульсов T при одновременном повышении их длительности дает возможность увеличить электролитно-плазменную составляющую процесса и достигнуть низ-

кой шероховатости при общем снижении энергоемкости процесса.

Цель исследований – изучение влияния характеристик импульсов разработанного процесса и концентрации электролита на плотность тока и длительность электрохимической и электролитно-плазменной стадий, сравнительный анализ эффективности использования импульсного процесса ЭПО вместо традиционного ЭПО на постоянном напряжении.

Материалы, оборудование и методы исследований

Для исследований использовали регулируемый от 0 до 300 В источник питания мощностью 12 кВт и мощный электронный ключ, позволяющий формировать импульсы тока заданной длительности амплитудой до 40 А (рис. 2) [14].

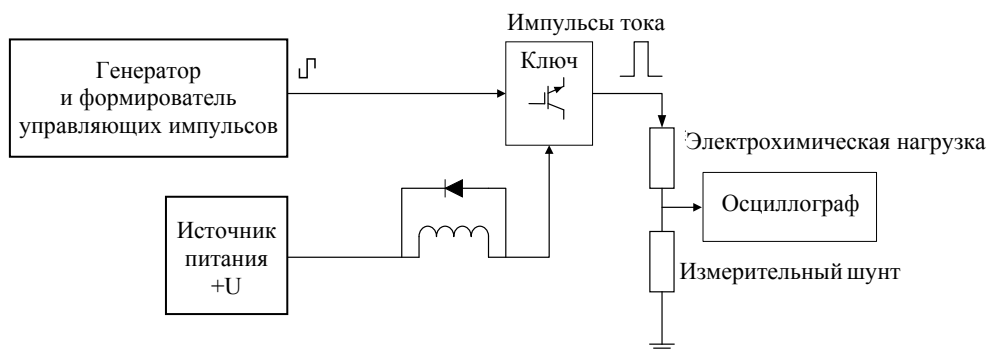


Рис. 2. Блок-схема источника питания для исследования импульсного процесса электролитно-плазменной обработки

Fig. 2. Block diagram of power supply for study of pulsed electrolyte-plasma treatment process

В качестве образцов использовали прутки из коррозионно-стойкой стали AISI 321 диаметром 1,8 мм. Обработку образцов выполняли в электрохимической ячейке с катодом из коррозионно-стойкой стали в форме трубы диаметром 100 мм. В качестве электролита использовали водный раствор сульфата аммония концентрацией до 40 %. Температура электролита составляла от 30 до 90 °С. Обработку проводили при следующих импульсных режимах: амплитуда напряжения 90–300 В, длительность импульсов 0,45–5,00 мс, коэффициент заполнения 33–83 %.

Контроль и запись формы импульсов тока осуществлялись запоминающим цифровым осциллографом С8-46/1 с помощью токового шунта с сопротивлением 0,05 Ом. Длительности стадий импульсного процесса устанавливали по осциллограммам. Начало электролитно-плазменной стадии определяли по возникновению высокочастотных импульсов малой амплитуды. Плотность тока находили как отношение силы тока к площади обрабатываемого образца. Внешний вид образцов до и после обработки представлен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид образцов до и после обработки
Fig. 3. Appearance of samples before and after processing

Результаты исследований и их обсуждение

Период следования импульсов T включает длительности электрохимической $t_{эx}$ и электролитно-плазменной $t_{эп}$ стадий и паузы между импульсами. Длительность импульса t состоит из длительностей $t_{эx}$ и $t_{эп}$. Во время электрохимической стадии происходит основной съем металла, поэтому ее длительность оказывает наиболее существенное влияние на производительность импульсного процесса.

Плотность тока в коротком высокоэнергетическом пике электрохимической стадии ($i_{эx}$) достигает сверхвысоких значений, на порядок превышающих соответствующие значения для существующих электрохимических процессов, за счет чего обеспечивается большой съем металла. Так, с увеличением напряжения импульса с 90 до 240–300 В происходит пропорциональное повышение плотности тока со 100–130 до 330–400 А/см² (концентрация электролита 20 %, длительность импульса 5 мс). Причем температура электролита не оказывает существенного влияния на плотность тока (рис. 4).

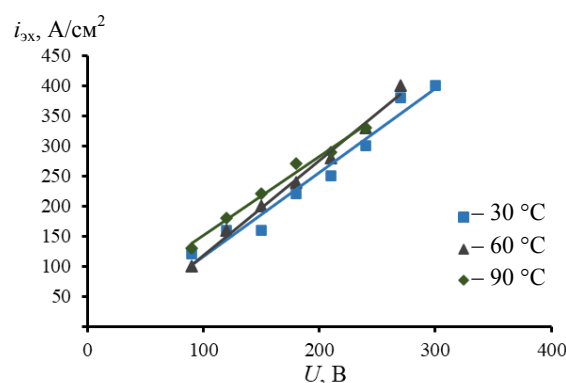


Рис. 4. Влияние напряжения на плотность тока электрохимической стадии процесса при различных значениях температуры электролита

Fig. 4. Effect of voltage on current density of electrochemical stage of process at different values of electrolyte temperature

Величина $t_{эx}$, которая фактически определяет время установления электролитно-плазменной стадии от начала включения напряжения, зависит от импульсных характеристик процесса (длительность импульса, амплитуда, коэффициент заполнения), а также от температуры и состава электролита. На рис. 5 представлены зависимости длительностей электрохимической $t_{эx}$ и электролитно-плазменной $t_{эп}$ стадий процесса от длительности импульса t при различных значениях коэффициента заполнения, полученные при напряжении 100 В, концентрации 20 % и температуре 90 °С. В исследуемом диапазоне значений длительности импульса (от 0,45 до 5,00 мс) наблюдается плавное увеличение длительности электрохимической стадии (или времени установления электролитно-плазменной стадии) – значение $t_{эx}$ в зависимости от коэффициента заполнения меняется от 0,03–0,15 до 0,25–0,40 мс (рис. 5а).

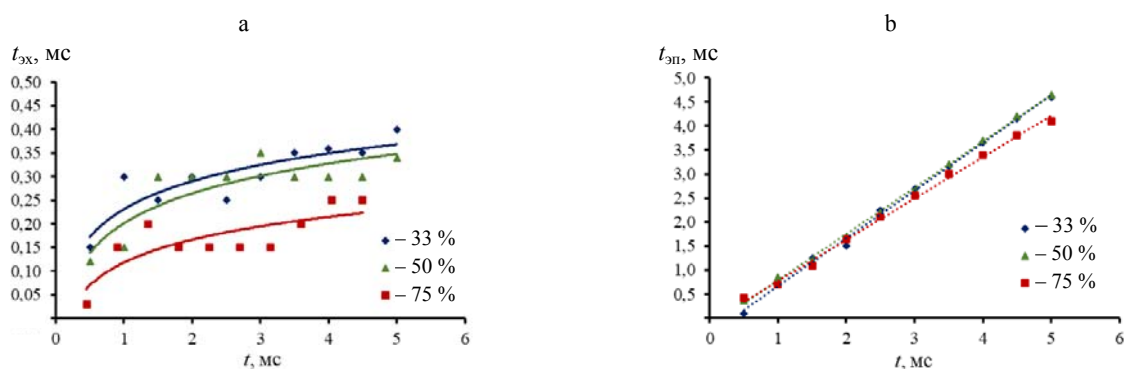


Рис. 5. Влияние длительности импульса на длительность стадий процесса

при различных значениях коэффициента заполнения: а – электрохимическая стадия; б – электролитно-плазменная стадия

Fig. 5. Effect of pulse duration on duration of process stages at different values of filling factor:

а – electrochemical stage; б – electrolyte-plasma stage

Причем наиболее интенсивный рост $t_{эx}$ наблюдается при минимальных значениях длительности импульсов t . Данный характер зависимости можно объяснить термодинамическими особенностями процесса ЭПО. Так, условием возникновения электролитно-плазменной стадии является формирование вокруг образца стабильной парогазовой оболочки – кипящего слоя с высокой напряженностью электрического поля, в котором происходят ионизация паров и возникновение разрядов. Для формирования парогазовой оболочки требуются некоторое время ($t_{эx}$) и расход энергии. В условиях импульсного электролитно-плазменного процесса вокруг поверхности образца происходят чередующиеся образование и затухание парогазовой оболочки. Чем больше пауза между высокоэнергетическими пиками электрохимической стадии, энергия в которой за счет большой силы тока в разы превышает энергию электролитно-плазменной стадии, тем больше теплоты успевает перейти от приповерхностной зоны образца в объем электролита и тем больше времени и энергии требуется для возникновения электролитно-плазменного процесса во время последующего импульса.

Существенное влияние на длительность электрохимической стадии оказывает коэффициент заполнения, который определяется как отношение времени действия импульса к периоду следования. С увеличением коэффициента заполнения длительность пауз между импульсами уменьшается, поэтому время и энергия, необходимые для возникновения электролитно-

плазменного процесса во время последующего импульса, также уменьшаются (рис. 5а).

Электролитно-плазменная стадия протекает в течение большей части времени импульса (при исследованных параметрах от 60 до 94 %). Поэтому ее длительность $t_{эп}$ соизмерима с длительностью самого импульса. Значение $t_{эп}$ увеличивается с повышением длительности импульса t по близкой к линейной закономерности и практически не зависит от коэффициента заполнения (рис. 5б).

Так же, как и при традиционной ЭПО с применением постоянного тока, в импульсном процессе ЭПО величина напряжения подаваемого импульса и температура электролита оказывают определяющее влияние на условия формирования парогазовой оболочки, т. е. на изменение длительности электрохимической стадии. Чем больше напряжение импульса и выше температура электролита, тем меньше энергии и времени требуется для формирования парогазовой оболочки вокруг образца и возникновения электролитно-плазменной стадии, соответственно тем меньше продолжительность электрохимической стадии. Зависимости длительности электрохимической стадии от напряжения обработки при различных значениях температуры электролита (концентрация электролита 20 %, длительность импульса 5 мс) представлены на рис. 6. При обработке в холодном электролите (30 °С) при напряжении 90 В электрохимическая стадия занимает всю длительность импульса – 5 мс. Электролитно-

плазменная стадия возникает при увеличении напряжения импульса до 120 В ($t_{\text{эх}} = 3,75$ мс). С дальнейшим увеличением напряжения до 300 В длительность электрохимической стадии уменьшается до 2 мс. При значениях температуры электролита 60 и 90 °С электролитно-плазменная стадия возникает уже при напряжении импульса 90 В. Причем в случае обработки в электролите с температурой 90 °С длительность электрохимической стадии составляет незначительную часть длительности всего импульса (8 %) и уменьшается с 0,4 до 0,18 мс при увеличении напряжения с 90 до 240 В.

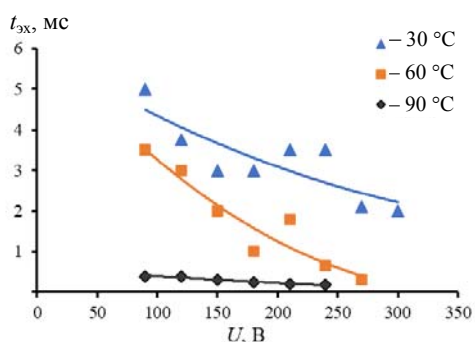


Рис. 6. Влияние напряжения на длительность электрохимической стадии процесса при различных значениях температуры электролита

Fig. 6. Effect of voltage on duration of electrochemical stage of process at different values of electrolyte temperature

С повышением концентрации электролита наблюдается уменьшение длительности электрохимической стадии, т. е. происходит более быстрое формирование парогазовой оболочки. На рис. 7 представлена зависимость длительности электрохимической стадии $t_{\text{эх}}$ от концентрации при температуре электролита 90 °С. Чем больше концентрация электролита, тем лучше его проводимость и соответственно больше плотность тока в электрохимическом процессе. Поэтому время установления электролитно-плазменной стадии с увеличением концентрации электролита уменьшается. Добавление 1 % лимонной кислоты в качестве комплексобразующего компонента при низкой концентрации электролита привело к увеличению длительности электрохимической стадии, что связано с уменьшением проводимости электролита и плотности тока.

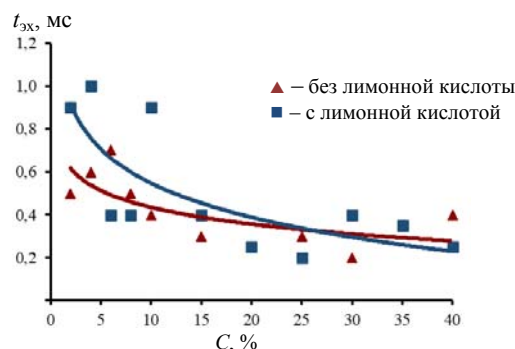


Рис. 7. Влияние концентрации электролита на длительность электрохимической стадии

Fig. 7. Effect of electrolyte concentration on duration of electrochemical stage

Для оценки эффективности использования импульсного процесса ЭПО вместо традиционного ЭПО при постоянном напряжении выполнен расчет энергозатрат, необходимых для съема равного слоя металла с поверхности образца. Обработку образцов площадью 0,42 см² с применением двух методов выполняли с длительностью, необходимой для уменьшения их диаметра с 1,80 до 1,70 мм (съем 100 мкм). ЭПО выполняли при следующих параметрах: напряжение 160 В, концентрация электролита 4 %, температура электролита 80 °С. Импульсную ЭПО проводили при тех же параметрах, при этом длительность импульса составляла 5 мс с периодом следования 6 мс. Время, необходимое для уменьшения диаметра образца на 100 мкм, составило: 769 с – для ЭПО с применением постоянного тока (скорость съема 7,8 мкм/мин); 150 с – для импульсного ЭПО (40,0 мкм/мин). Таким образом, скорость съема в импульсном процессе ЭПО больше чем в пять раз превышает скорость съема в традиционном процессе ЭПО с применением постоянного тока.

Расчет энергии, потребляемой в импульсе, показал, что в высокоэнергетическом пике электрохимической стадии, когда происходит основной съем металла за счет высокой плотности тока, мощность достигала значения 1600 Вт. Мощность в электролитно-плазменной стадии составляла 34 Вт (рис. 8а). Суммарные затраты энергии, необходимой для уменьшения диаметра образца на 100 мкм, в импульсном процессе на 19 % меньше, чем в традиционном процессе при постоянном напряжении. При этом в структуре энергозатрат импульсного процесса 83 % занимает электрохимическая стадия, обеспечивающая высокую производительность процесса (рис. 8б).

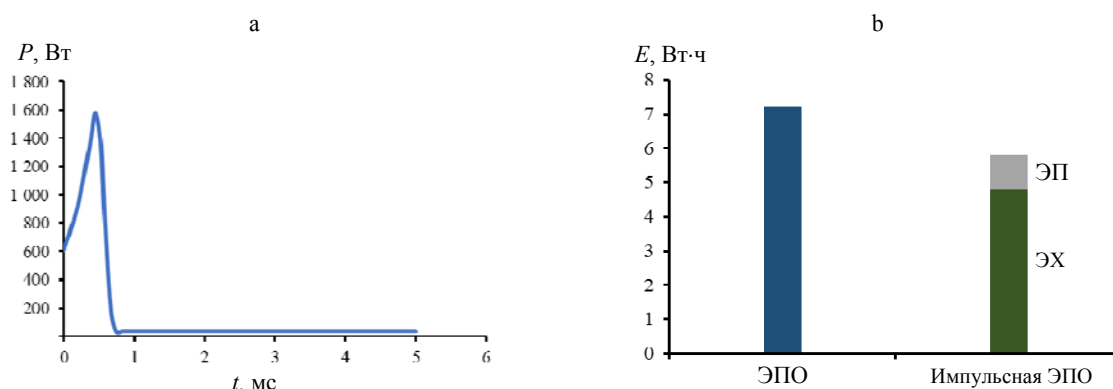


Рис. 8. Результаты расчета эффективности использования импульсного процесса электролитно-плазменной обработки: а – изменение потребляемой мощности во время действия импульса; б – затраты электроэнергии в импульсном и традиционном процессах электролитно-плазменной обработки

Fig. 8. Results of calculating efficiency of using pulsed electrolyte-plasma treatment process: a – change of consumed power during pulse; b – electricity consumption in pulsed and traditional electrolyte-plasma treatment

Образцы изделий из коррозионно-стойкой стали после полирования в импульсном процессе ЭПО представлены на рис. 9.



Рис. 9. Образцы изделий из коррозионно-стойкой стали после полирования в импульсном процессе электролитно-плазменной обработки

Fig. 9. Samples of products made of corrosion-resistant steel after polishing in pulsed electrolyte-plasma treatment process

ВЫВОДЫ

1. Разработан новый импульсный метод полирования и размерной обработки металлических материалов (импульсная электролитно-плазменная обработка), обеспечивающий снижение энергоемкости и повышение эффективности по сравнению с традиционной электролитно-плазменной обработкой с применением постоянного напряжения.

2. Высокая эффективность метода импульсной электролитно-плазменной обработки достигается за счет основного интенсивного съема металла при реализации электрохимической стадии с высокой плотностью тока и оптимизации продолжительности электролитно-плазменной стадии, при которой обеспечивается высокое качество поверхности.

3. Скорость съема металла в разработанном импульсном процессе электролитно-плазменной обработки больше чем в пять раз превышает скорость съема в процессе электролитно-плазменной обработки с применением постоянного напряжения и составляет 40 мкм/мин, при этом энергетические затраты на реализацию импульсного процесса на 19 % меньше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Plasma Electrolyte Polishing of Titanium and Niobium Alloys in Low Concentrated Salt Solution Based Electrolyte / Y. Aliakseyeu [et al.] // Mechanics. 2021. Vol. 27, No 1. P. 88–93. <http://doi.org/10.5755/j02.mech.25044>.
2. Aliakseyeu, Y. Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces / Y. Aliakseyeu, A. Korolyov, A. Bezyazychnaya // Proceedings of the 14th International Scientific Conference “CO-MAT-TECH-2006”. Trnava, 19–20 Oct. 2006. Slovakia, 2006. P. 6.
3. Plasma Electrolytic Polishing – an Overview of Applied Technologies and Current Challenges to Extend the Polishable Material Range / K. Nestler [et al.] // Proceedings of the 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII), 8–22 Apr. 2016, Tokyo, Japan: Procedia CIRP 42, 2016. P. 503–507. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.240>.
4. Vacuum Deposited Polymer and DLC Multilayer Coatings on Austenitic Steel, Structure and Tribotechnical Properties in Physiological Solution / V. P. Kazachenko [et al.] // International Conference on Industrial Tribology. India: Bangalore, 2006. P. 55.
5. Формирование конических изделий малого диаметра методом размерной электролитно-плазменной обработки / Ю. Алексеев [и др.] // Proceedings of the International Scientific Conference on Mobile Machines, Kaunas, Lithuania, 20–22 Sept., 2017. Lithuania, 2017. P. 47–54.
6. Модель размерного съема материала при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2012. № 3. С. 3–6.

7. Комбинированная технология изготовления гибких ультразвуковых концентраторов-инструментов / Ю. Г. Алексеев [и др.]; под общ. ред. Б. М. Хрусталева. Минск: БНТУ, 2015. 203 с.
8. Электролитно-плазменная обработка внутренних поверхностей трубчатых изделий / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 1. С. 61–68. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-1-61-68>.
9. Исследование влияния промежуточной электролитно-плазменной обработки в процессе деформационного упрочнения волочением / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2012. № 11. С. 85–90.
10. Исаевич, Л. А. Исследование процесса получения высокопрочной проволоки из стали 12X18H10T волочением с электролитно-плазменной обработкой поверхности / Л. А. Исаевич, Ю. Г. Алексеев А. Ю. Королёв // Вестник БНТУ. 2005. № 6. С. 30–33.
11. Семченко, Н. И. Коррозионное поведение аустенитных нержавеющей сталей после электролитно-плазменного полирования / Н. И. Семченко, А. Ю. Королёв // Сб. тр. IV Междунар. симп. по теоретич. и приклад. плазмохимии, 13–18 мая 2005 г., Иваново, Россия. Иваново: Ивановский гос. хим.-технол. ун-т, 2005. Т. 2. С. 406–409.
12. Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхностного слоя стали 12X18H10T / Ю. О. Лисовская [и др.] // Вестні Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2008. № 3. С. 24–29.
13. 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>.
14. 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 04.02.2021

Подписана в печать 06.04.2021

Опубликована онлайн 30.07.2021

REFERENCES

1. Aliakseyeu Y., Bubulis A., Minchenya V., Korolyov A., Niss V., Kandrotaitė Janutienė R. (2021) Plasma Electrolyte Polishing of Titanium and Niobium Alloys in Low Concentrated Salt Solution Based Electrolyte. *Mechanics*, 27 (1), 88–93. <http://doi.org/10.5755/j02.mech.25044>.
2. Aliakseyeu Y., Korolyov A., Bezyazychnaya A. (2006) Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces. *Proceedings of the 14th International Scientific Conference "CO-MAT-TECH-2006"*. Trnava, 19–20 Oct. 2006. Slovakia, 6.
3. Nestler K., Böttger-Hiller F., Adamitzki W., Glowa G., Zeidler H., Schubert A. (2016) Plasma Electrolytic Polishing – an Overview of Applied Technologies and Current Challenges to Extend the Polishable Material Range. *Proceedings of the 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII)*, 8–22 Apr. 2016, Tokyo, Japan, *Procedia CIRP*, 42, 503–507. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.240>.
4. Kazachenko V. P. [et al.] (2006) Vacuum Deposited Polymer and DLC Multilayer Coatings on Austenitic Steel, Structure and Tribotechnical Properties in Physiological Solution. *International Conference on Industrial Tribology*. India, Bangalore, 55.
5. Aliakseyeu Y. G., Korolyov A. Y., Minchenya V. T., Niss V. S. (2017) Formation of Small-Diameter Conical Products by Method of Dimensional Electrolytic-Plasma Treatment. *Proceedings of the International Scientific Conference on Mobile Machines, Kaunas, Lithuania, Sept. 20–22, 2017*, 47–54 (in Russian).
6. Alekseev Yu. G., Korolyov A. Yu., Parshuta A. E., Niss V. S. (2012) Model for Metal Removal in Electrolyte-Plasma Treatment of Cylindrical Surfaces. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (3), 3–6 (in Russian).
7. Alekseev Y. G., Korolyov A. Y., Minchenya V. T., Niss V. S., Parshuta A. E., Khrustalev B. M. (2015) *Combined Manufacturing Technology of Flexible Ultra Sonic Concentrators-Instruments*. Minsk, Belarusian National Technical University. 203 (in Russian).
8. Alekseev Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuta A. E. (2016) Electrolytic-Plasma Treatment of Inner Surface of Tubular Products. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 15 (1), 61–68. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-1-61-68> (in Russian).
9. Alekseev Yu. G., Isaevich L., Korolyov A. Yu., Niss V. S. (2012) Investigation of the Effect of Intermediate Electrolyte-Plasma Treatment during Deformation Strengthening by Drawing. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye Nauki = Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences*, (11), 85–90 (in Russian).
10. Isaevich L. A., Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu. (2005) Investigation of the Process of Obtaining High-Strength Wire from Steel 12X18H10T by Drawing with Electrolytic-Plasma Surface Treatment. *Vestnik BNTU [Bulletin of the Belarusian National Technical University]*, (6), 30–33 (in Russian).
11. Semchenko N. I., Korolyov A. Yu. (2005) Corrosion Behavior of Austenitic Stainless Steels after Electrolyte-Plasma Polishing. *Sb. Tr. IV Mezhdunar. Simp. po Teoretich. i Priklad. Plazmokhimii, 13–18 Maya 2005 g., Ivanovo, Rossiya. T. 2 [Proceedings of the IV International Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry, Ivanovo, Russia. Vol. 2]*. Ivanovo, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 406–409 (in Russian).
12. Lisovskaya Yu. O., Alekseev Yu. G., Korolev A. Yu., Niss V. S., Fomikhina I. V. (2008) Effect of Electrolytic-Plasma Treatment on the Structure and Properties of the Surface Layer of 12X18H10T Steel. *Vesti Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seriya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, (3), 24–29 (in Russian).
13. Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Parshuta A. E., Niss V. S. (2017) Electrolyte-Plasma Treatment under Non-Stationary Mode in a High-Gradient Electric Field. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (5), 391–399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399> (in Russian).
14. Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuta 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 Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (3), 246–257. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-61-3-246-257> (in Russian).

Received: 04.02.2021

Accepted: 06.04.2021

Published online: 30.07.2021