

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399

УДК 621.9.047.7

Электролитно-плазменная обработка при нестационарных режимах в условиях высокоградиентного электрического поля

Канд. техн. наук, доц. Ю. Г. Алексеев¹⁾, канд. техн. наук А. Ю. Королев¹⁾, инж. А. Э. Паршута¹⁾, канд. техн. наук, доц. В. С. Нисс¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Электролитно-плазменная обработка получила широкое распространение в промышленности в качестве альтернативы традиционным химическим, электрохимическим и механическим методам повышения качества поверхности изделий из металлических материалов. Преимуществами такой обработки являются высокая интенсивность сглаживания микронеровностей, применение в качестве электролитов растворов солей низкой концентрации, возможность обработки изделий сложной формы. Основным недостатком метода – высокая энергоемкость, поэтому метод можно отнести в его классическом виде к энергоемкому производству. Возможным методом снижения энергоемкости является обработка в нестационарных режимах, которые возникают в переходной зоне между коммутационным и устойчивым процессом электролитно-плазменной обработки и характеризуются периодическим образованием устойчивой парогазовой оболочки и переходом к электрохимическому процессу. В статье приводятся результаты исследования влияния высокоградиентного электрического поля при нестационарных режимах электролитно-плазменной обработки на энергетические параметры процесса и характеристики обрабатываемой поверхности. Установлено, что высокоградиентное электрическое поле оказывает существенное влияние на снижение удельной потребляемой мощности, что объясняется уменьшением потерь в электролите и влиянием поля на образование и поддержание парогазовой оболочки. В результате исследования влияния высокоградиентного электрического поля при нестационарных режимах электролитно-плазменной обработки на характеристики поверхностного слоя установлено, что значительная импульсная плотность тока в зоне преимущественно электрохимической обработки приводит к селективному травлению поверхности и образованию характерного микрорельефа поверхности с развитой пористой микроструктурой с размерами пор от 0,3 до 2,5 мкм. Наиболее выраженная пористая микроструктура обеспечивается при напряжении 270–300 В и величине добавочной индуктивности 3,2 мГн.

Ключевые слова: электролитно-плазменная обработка, парогазовая оболочка, поверхность, индуктивность, пористая структура

Для цитирования: 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. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399

Electrolyte-Plasma Treatment under Non-Stationary Modes in High-Gradient Electric Field

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

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

Abstract. Electrolyte-plasma treatment has become widespread in industry as an alternative to traditional chemical, electrochemical and mechanical methods for surface quality improvement of products made of metallic materials. Advantages

Адрес для переписки

Королев Александр Юрьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-25-98
korolyov129@gmail.com

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
korolyov129@gmail.com

electrolyte-plasma treatment are a high intensity of microroughness smoothing, application of low concentration salt solutions as electrolytes, possibility to machine workpieces that have complex shape. The main disadvantage of this method is high power consumption, so the method can be considered in its classical form as to the power-consuming industry. A possible method for reduction of power consumption is treatment in unsteady modes that arise in a transition zone between a switching and stable electrolyte-plasma treatment process and it is characterized by periodic formation of a stable vapor-gas shell and a transition to an electrochemical process. The paper presents results of investigations for the influence of a high-gradient electric field under unsteady electrolyte-plasma treatment modes on energy parameters of the process and characteristics of the treated surface. It has been established that a high-gradient electric field has a significant effect on the decrease in specific power consumption and it is explained by a decrease in electrolyte losses and influence of the field on formation and maintenance of the vapor-gas shell. As a result of the investigations for an influence of a high-gradient electric field being in unsteady EPT modes on characteristics of the surface layer it has been determined that a significant impulse current density in the zone of predominantly electrochemical treatment leads to a selective etching of the surface and formation of a characteristic micro relief of the surface with a developed porous microstructure having pore sizes from 0.3 to 2.5 microns. The most pronounced porous microstructure has been provided at a voltage of 270–300 V and an additional inductance of 3.2 mH.

Keywords: electrolytic-plasma treatment, vapor-gas shell, surface, inductance, porous structure

For citation: Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Parshuto A. E., Niss V. S. (2017) Electrolyte-Plasma Treatment under Non-Stationary Modes in High-Gradient Electric Field. *Science and Technique*. 16 (5), 391–399. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399 (in Russian)

Введение

Один из прогрессивных методов повышения качества поверхности металлических изделий – 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 для нанесения 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 вплоть до $Ra = 0,01$ мкм;
- высокую экологическую безопасность по сравнению с классическим электрохимическим полированием за счет применения электролитов на основе водных растворов солей общей концентрацией не более 5 % [11];
- повышение коррозионной стойкости поверхности [12, 13];
- возможность обработки деталей и изделий сложной формы.

Основной недостаток метода – высокая энергоёмкость. Плотность мощности в процессе обработки может достигать 300 Вт/см^2 , поэтому метод можно отнести в его классическом виде к энергоёмкому производству. В результате предварительных исследований установлено, что возможным методом снижения энергоёмкости является обработка в нестационарных режимах, которые возникают в переходной зоне между коммутационным и устойчивым процессом ЭПО и характеризуются периодическим образованием устойчивой парогазовой оболочки и переходом к электрохимическому процессу. Кроме того, анализ процессов, протекающих в парогазовой оболочке, показал, что величина градиента напряженности электрического поля также может оказывать значительное влияние на энергетические характеристики процесса ЭПО (при обычных условиях градиент электрического поля составляет $(6–7) \cdot 10^4 \text{ В/м}$).

Цель данной работы – моделирование переходных электрических процессов и исследование влияния высокоградиентного электрического поля при нестационарных режимах на энергетические параметры ЭПО и состояние поверхностного слоя обрабатываемого материала.

Оборудование для выполнения исследований

Для проведения экспериментальных исследований влияния высокоградиентного элект-

рического поля при нестационарных режимах ЭПО на энергетические параметры и характеристики поверхностного слоя спроектирована электролитическая ячейка, представленная на рис. 1. Ячейка содержит обрабатываемый образец 1 (пруток из стали 12Х18Н10Т диаметром 1,8 мм), резьбовую втулку 2 из фторопласта, анодный резервуар 3 из стали 12Х18Н10Т, изолятор-отбойник 4 из фторопласта, электрод-катод 5, патрубок для подачи электролита 6 и клеммы для подключения рабочего напряжения – катод 7 и анод 8. Канал 9 обеспечивает подачу электролита в электрод-катод. Площадь обрабатываемой поверхности составляет $0,95 \text{ см}^2$, при этом напряженность электрического поля у поверхности исследуемой детали до $13,5 \cdot 10^4 \text{ В/м}$.

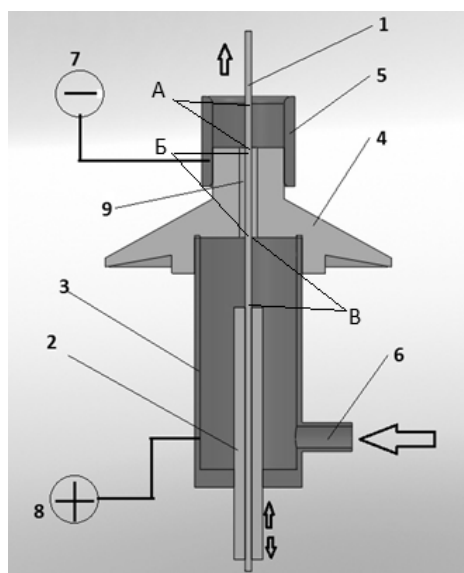


Рис. 1. Ячейка для экспериментальных исследований

Fig. 1. Cell for experimental studies

Зона А имеет положительную поляризацию относительно электрода-анода, и у поверхности детали образуется парогозовая оболочка, приводящая к полированию поверхности А. Зона Б защищена от обработки изолятором-отбойником. Регулировкой размеров зоны В втулкой можно перевести устойчивый режим ЭПО в нестационарный апериодический режим в нижней части зоны А, приводящий к протеканию импульсного электрохимического процесса, вызывающего интенсивный сьем металла в этой зоне.

Ячейка работает следующим образом. Электроды 7 и 8 подключаются к соответствующим полюсам источника питания напряжением 240–320 В. Через патрубок подается электролит – 4–8%-й водный раствор сульфата аммония температурой 40–80 °С.

Схема основана на использовании выпрямителя ДЕЗ-230-50 и трехфазного автотрансформатора, позволяющего регулировать постоянное выходное напряжение выпрямителя в пределах 0–320 В при токе нагрузки до 50 А. Для выбора различных значений индуктивностей $L1-L3$ применены выключатели $S3-S5$. Номинал емкости $C1$ составлял 4 мкФ. Добавочная индуктивность изменялась в диапазоне 0–3L с шагом 1L ($L = 1,6 \text{ мГн}$). Для контроля и регистрации электрических режимов процесса использовали запоминающий цифровой осциллограф С8-46/1.

Электронно-микроскопические фотографии поверхности образцов после ЭПО при нестационарных режимах в условиях высокоградиентного электрического поля были сделаны с помощью сканирующего электронного микроскопа Vega Tescan.

Методы исследования

Для анализа энергетических параметров электрических процессов в электролитической ячейке при ЭПО в высокоградиентном электрическом поле рассмотрена схема с включенным в нее нелинейным сопротивлением R N -типа [14], аналогичным характеристике нелинейного сопротивления парогозовой оболочки при ЭПО (рис. 2).

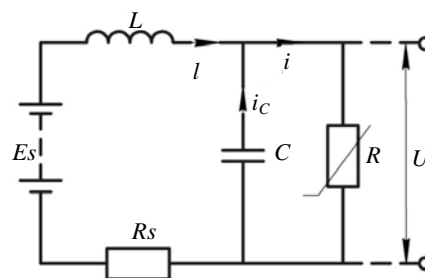


Рис. 2. Эквивалентная схема электролитно-плазменной обработки

Fig. 2. Equivalent circuit of electrolytic-plasma treatment (EPT)

Рассматриваемая система содержит нелинейное сопротивление R , описывающее пове-

дение парогазовой оболочки при ЭПО, подключенное через выходное сопротивление R_s к источнику постоянного технологического напряжения E_s . Значения E_s и R_s задают исходную точку работы ячейки на N -образной вольтамперной характеристике (ВАХ) процесса ЭПО в условиях высокоградиентного электрического поля. От выбора этой точки и параметров реактивных элементов (в реальном источнике питания – $L = 4,8$ мГн и $C = 4$ мкФ) зависит режим работы ячейки. Ниже рассмотрены аналитические исследования переходных процессов работы цепи с различными технологическими режимами (установкой рабочего напряжения E_s в диапазоне 240–320 В). Поведение данной схемы при $E_s = \text{const}$ описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{di}{dt} = \frac{E_s - iR - u}{L}; \quad (1)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{i - I(u)}{C}. \quad (2)$$

Для решения этой нелинейной системы использовали программный пакет Mathematica 9 [15], имеющий для дифференциальных уравнений встроенную функцию системы NDSolve с выводом результатов в графической форме. Программный пакет Mathematica 9 позволяет найти решение указанной выше системы в виде временных зависимостей тока $i(t)$ в цепи $Rs-L$, напряжения $u(t)$ на нелинейном сопротивлении R и значение потребляемой мощности с использованием подпрограмм решения методом Рунге – Кутты. Решение находится при начальных условиях $i(0) = 0$ и $u(0) = 0$, начиная с момента времени $t = 0$. Это позволяет, не меняя методики моделирования цепи, задавать любые N -образные ВАХ.

Для моделирования нужно иметь непрерывную вольтамперную характеристику, описываемую полиномиальной интерполяцией, выполняемой с помощью встроенной функции Interpolation при степени полинома, равной 4. Экспериментальные данные для интерполяции снимались при изменении рабочего напряжения в диапазоне 0–320 В, при рабочей температуре электролита (водного раствора сульфата аммония) 40 и 80 °С и концентрации электролита 4 и 8 %. Вольтамперная характеристика, построенная по результатам интерполяции, представлена на рис. 3.

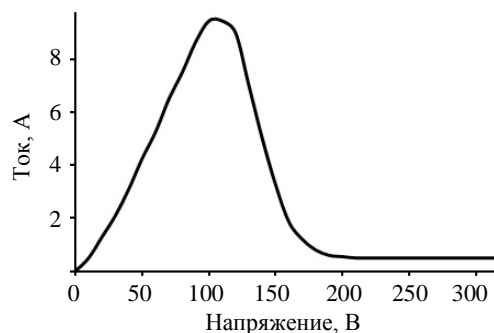


Рис. 3. Вольтамперная характеристика процесса электролитно-плазменной обработки в высокоградиентном электрическом поле при температуре электролита 40 °С и концентрации 4 %
 Fig. 3. Current-voltage characteristic of EPT process in high-gradient electric field at electrolyte temperature of 40 °С and concentration of 4 %

Результаты и обсуждение

По результатам моделирования получены графики, описывающие поведение электрических параметров процесса (потребляемой мощности, напряжения на ячейке, напряжения источника питания, тока) при различном рабочем напряжении и температуре электролита. В качестве примера на рис. 4 приведены результаты моделирования при температуре электролита 80 °С, концентрации 8 % и напряжении 320 В.

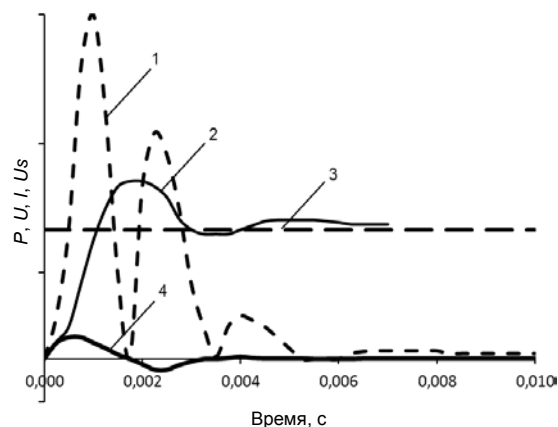


Рис. 4. Переходные процессы электрических режимов электролитно-плазменной обработки в высокоградиентном электрическом поле при температуре электролита 80 °С, концентрации 8 % и напряжении 320 В: 1 – потребляемая мощность P , Вт; 2 – напряжение на ячейке U , В; 3 – напряжение источника питания U_s , В; 4 – ток I , А
 Fig. 4. Transient processes of electric modes for EPT in high-gradient electric field at temperature of 80 °С, concentration of 8 % and voltage of 320 В: 1 – power consumption P , W; 2 – voltage on cell U , V; 3 – power supply voltage U_s , V; 4 – current I , A

Результаты испытаний показывают, что даже незначительное изменение параметров одной и той же цепи в источнике питания ЭПО способно существенно изменить режимы ее работы. На основании полученных данных построены зависимости, характеризующие изменение амплитудного значения мощности и мощности в установившемся режиме от напряжения источника питания (рис. 5, 6).

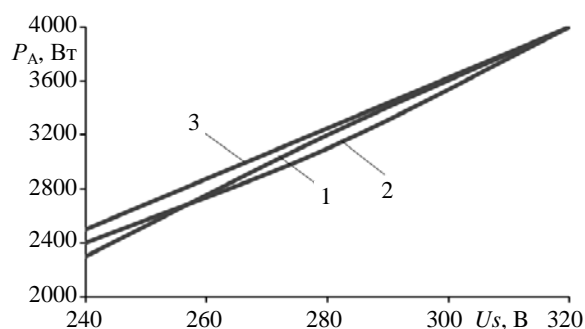


Рис. 5. Зависимость амплитудного значения мощности электролитно-плазменной обработки от напряжения источника питания в высокоградиентном электрическом поле при температуре T , °C: 1 – 40; 2 – 60; 3 – 80

Fig. 5. Dependence of amplitude value for EPT power on voltage of power supply in high-gradient electric field: 1 – $T = 40$ °C; 2 – $T = 60$ °C; 3 – $T = 80$ °C

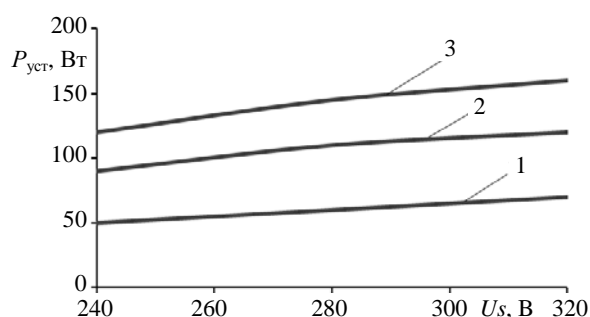


Рис. 6. Зависимость мощности электролитно-плазменной обработки в установившемся режиме от напряжения источника питания в высокоградиентном электрическом поле при температуре T , °C: 1 – 40; 2 – 60; 3 – 80

Fig. 6. Dependence of EPT power in steady state on voltage of power source in high-gradient electric field: 1 – $T = 40$ °C; 2 – $T = 60$ °C; 3 – $T = 80$ °C

Анализ зависимостей, представленных на рис. 5, 6, показывает, что максимальная мощность, потребляемая ячейкой в начальный период времени, после подачи напряжения достигает 2,3–4,2 кВт/см², а мощность в установившемся режиме ЭПО – 50–140 Вт/см².

Перегрузка по мощности составляет 40–50 раз, что указывает на необходимость повышенного внимания к надежности всех составляющих элементов электрической схемы источника питания ЭПО.

Сравнение удельной мощности ЭПО в низко- и высокоградиентном электрических полях при ЭПО показывает существенное снижение удельной потребляемой мощности (рис. 7) с 280 до 160 Вт/см² при 45 °C и с 120 до 70 Вт/см² при 80 °C. Такое снижение мощности при ЭПО можно объяснить уменьшением потерь в электролите и влиянием высокоградиентного электрического поля на образование и поддержание парогазовой оболочки.

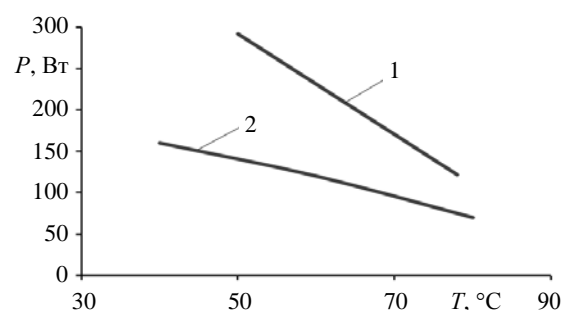


Рис. 7. Сравнение удельной мощности электролитно-плазменной обработки в: 1 – низкоградиентном; 2 – высокоградиентном полях

Fig. 7. Comparison of specific power for EPT field: 1 – low-gradient field; 2 – high-gradient field

В качестве примера на рис. 8 представлены результаты моделирования переходного процесса при нестационарных режимах ЭПО в высокоградиентном электрическом поле при температуре электролита 40 °C и концентрации 4 %.

Рассмотрение диаграмм переходных процессов при нестационарных режимах показывает наличие существенного броска тока в начальной стадии процесса при непосредственном контакте электролита поверхности детали с последующим установлением режима колебаний тока и напряжения. Такой режим существенно зависит от величины индуктивности, включенной последовательно с электролитической ячейкой.

Для определения энергии, выделяющейся в ячейке в нестационарном режиме, анализировались осциллограммы тока при различных режимных параметрах процесса – напряжения

питания, концентрации электролита и величины добавочной индуктивности. Пример осциллограммы, полученной при добавочной индуктивности $1L$, напряжении 240 В , концентрации электролита 4% и температуре $40\text{ }^\circ\text{C}$, представлен на рис. 9.

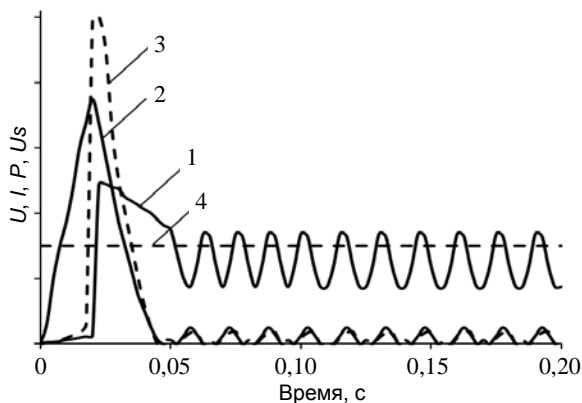


Рис. 8. Диаграмма переходного процесса при нестационарных режимах электролитно-плазменной обработки в высокоградиентном электрическом поле:

- 1 – напряжение на ячейке U , В;
- 2 – ток I , А;
- 3 – потребляемая мощность P , Вт;
- 4 – напряжение источника питания U_s , В

Fig. 8. Diagram of transient process for unsteady EPT modes in high-gradient electric field:

- 1 – voltage on cell U , V;
- 2 – current I , A;
- 3 – power consumption P , W;
- 4 – power supply voltage U_s , V

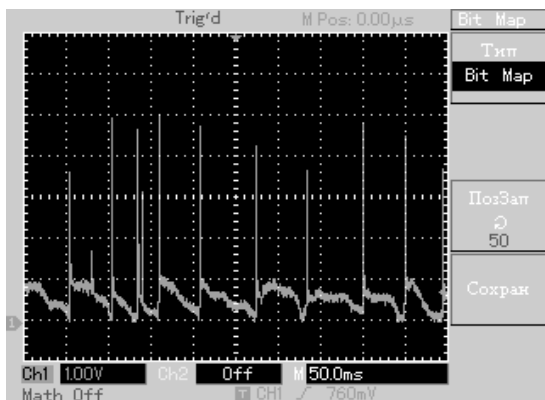


Рис. 9. Осциллограмма тока при электролитно-плазменной обработке в высокоградиентном электрическом поле при добавочной индуктивности $3L$, напряжении 300 В , концентрации электролита 4% и температуре $40\text{ }^\circ\text{C}$ (разрешение по току – $2,5\text{ А/дел}$)

Fig. 9. Oscillogram of current during EPT in high-gradient electric field with $3L$ additional inductance, voltage of 300 V , electrolyte concentration of 4% and temperature of $40\text{ }^\circ\text{C}$ (current resolution 2.5 A/div)

Оценка полученных экспериментальных осциллограмм показала существенное влияние

величины добавочной индуктивности на характер протекания тока через парогазовую оболочку при нестационарных режимах обработки. Для анализа энергетических параметров ЭПО при нестационарных режимах обработки выбирали длительность одного кадра осциллограммы в 500 мс и оценивали количество и амплитуду импульсов тока, свидетельствующих о возникновении нестационарного режима ЭПО с кратковременным переходом в стадию электрохимического процесса. Результаты измерения энергии, выделяющейся в ячейке, представлены на рис. 10.

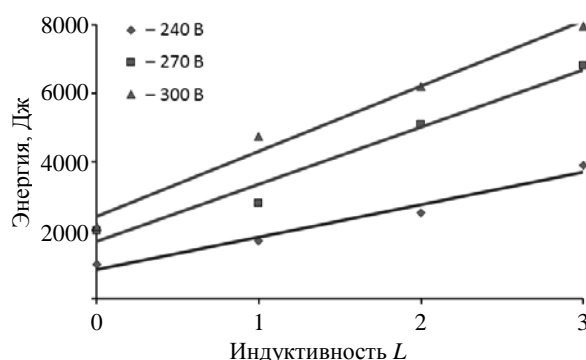


Рис. 10. Энерговыведение в ячейке в зависимости от значения рабочего напряжения и величины добавочной индуктивности

Fig. 10. Energy liberation in cell according to operating voltage and additional inductance values

Анализ полученных результатов показывает, что потребляемая ячейкой энергия повышается с увеличением индуктивности. Так, рост индуктивности от 0 до $4,8\text{ мГн}$ приводит к повышению потребляемой энергии от $0,96\text{--}2,25$ до $3,84\text{--}7,98\text{ кДж}$. Это связано с перераспределением энергии в электрохимическую составляющую процесса ЭПО.

Все образцы, обработанные в высокоградиентном электрическом поле при нестационарных режимах, имели типичное распределение зон изменения внешнего вида поверхности (рис. 11): 1 – катодная зона; 2 – зона скопления пузырьков водорода в верхней части катодной зоны; 3 – зона разделительной перегородки из фторопласта; 4 – зона преимущественно электрохимической обработки; 5 – зона преимущественно ЭПО; 6 – переходная зона между поверхностью электролита и воздухом; 7, 8 – необработываемые зоны.

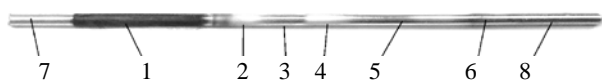


Рис. 11. Характерные зоны обработки образцов
 Fig. 11. Typical processing zones for samples

Для зон обработки 4 и 5 выполняли анализ морфологии и микропрофиля обработанной поверхности с помощью сканирующей электронной микроскопии. Установлено существ-

венное отличие обработанной поверхности в зонах 4 и 5, что объясняется различным характером процессов, протекающих в этих зонах. Поверхность образцов в зоне 5 имеет сглаженный микропрофиль и характеризуется наличием нежелательных питтингов (рис. 12).

Поверхность образцов в зоне 4 имеет развитую пористую структуру с размерами пор от 0,3 до 2,5 мкм (рис. 13).

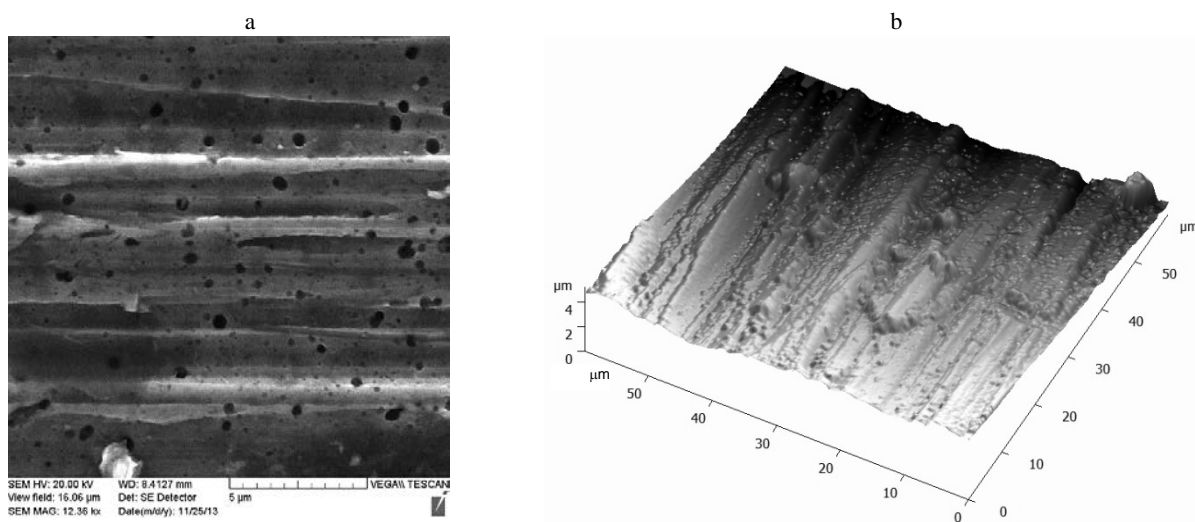


Рис. 12. Поверхность зоны 5 образца, полученного при добавочной индуктивности 3L, напряжении 240 В, концентрации электролита 8 % и температуре 40 °С: а – морфология поверхности; б – микропрофиль поверхности
 Fig. 12. Zone-5 surface of sample obtained with 3L additional inductance, 240 V voltage, 8 % electrolyte concentration and 40 °C temperature: a – surface morphology; b – surface microprofile

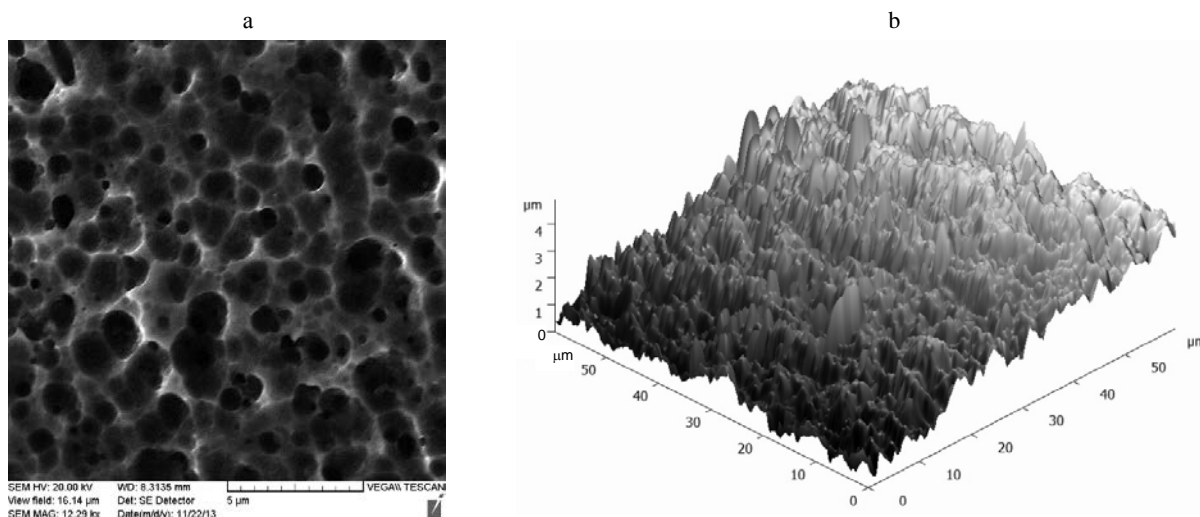


Рис. 13. Поверхность зоны 4 образца, полученного при добавочной индуктивности 2L, напряжении 270 В, концентрации электролита 4 % и температуре 40 °С: а – морфология поверхности; б – микропрофиль поверхности
 Fig. 13. Zone-4 surface of sample obtained with 2L additional inductance, 270 V voltage, 4 % electrolyte concentration and 40 °C temperature: a – surface morphology; b – surface microprofile

Наличие развитой поверхности в зоне 4 можно объяснить значительной электрохимической составляющей процесса съема, возникающей из-за близости этой зоны к перегородке и повышенной скорости электролита, снижающей толщину парогазовой оболочки и повышающей вероятность прямого контакта электролита с поверхностью образца. Значительная импульсная плотность тока в зоне 4 (выше средних значений в пять раз, согласно осциллограмме на рис. 9) приводит к селективному травлению поверхности и образованию характерного микрорельефа поверхности. Наиболее выражен этот процесс при напряжении 270–300 В и величине добавочной индуктивности $2L$ (3,2 мГн).

Формирование пористой структуры в высокоградиентном поле может быть эффективно при подготовке поверхности для нанесения покрытий с целью повышения их адгезии, для удержания лекарственных средств на изделиях медицинского назначения, а также для повышения остеоинтеграции имплантатов.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что высокоградиентное электрическое поле при электролитно-плазменной обработке оказывает существенное влияние на снижение удельной потребляемой мощности, что объясняется уменьшением потерь в электролите и влиянием высокоградиентного электрического поля на образование и поддержание парогазовой оболочки. Удельная мощность при обработке в высокоградиентном поле по сравнению с низкоградиентным снижается с 280 до 160 Вт/см² при температуре электролита 45 °С и с 120 до 70 Вт/см² при температуре электролита 80 °С.

2. В результате исследований влияния высокоградиентного электрического поля на энергетические параметры при нестационарных режимах электролитно-плазменной обработки установлено, что потребляемая ячейкой энергия повышается с увеличением индуктивности. Это связано с перераспределением энергии в электрохимическую составляющую процесса электролитно-плазменной обработки. Так, повышение индуктивности от 0 до 4,8 мГн приво-

дит к росту потребляемой энергии от 0,96–2,25 до 3,84–7,98 кДж.

3. В результате исследования влияния высокоградиентного электрического поля при нестационарных режимах электролитно-плазменной обработки на качественные характеристики поверхностного слоя установлено, что значительная импульсная плотность тока в зоне преимущественно электрохимической обработки приводит к селективному травлению поверхности и образованию характерного микрорельефа поверхности с развитой пористой микроструктурой с размерами пор от 0,3 до 2,5 мкм. Наиболее выраженная пористая микроструктура обеспечивается при напряжении 270–300 В и величине добавочной индуктивности 3,2 мГн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физико-механические свойства и электрополирующие процессы в материалах, находящихся в мощных электростатических и электромагнитных полях: отчет о НИР (заключ.) / Белорус. нац. техн. ун-т; рук. А. А. Кособуцкий. Минск, 2004. 61 с. № ГР 20022618.
2. Aliakseyeu, Yu. Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces / Yu. Aliakseyeu, A. Korolyov, A. Bezyazychnaya // CO-MAT-TECH-2006: Proceeding of the Abstracts 14 International Scientific Conference, Slovak University of Technology, 19–20 oct. 2006. Slovakia, Trnava. 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.
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. Особенности процессов размерной обработки металлических изделий электролитно-плазменным методом / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Литье и металлургия. 2005. № 4. С. 188–195.
6. Модель размерного съема материала при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей / Ю. 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. ISBN 978-985-550-702-5.
8. Электролитно-плазменная обработка внутренних поверхностей трубчатых изделий / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 1. С. 61–68. DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-1-61-68.

9. Исследование влияния промежуточной электролитно-плазменной обработки в процессе деформационного упрочнения волоочения на прочностные характеристики стали 12X18H9 / 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. Королев // Вестник БНТУ. 2005. № 6. С. 30–33.
11. Surface Properties of the Stainless Steel X10 CrNi 18/10 after Application of Plasma Polishing in Electrolyte / D. Vaňa [et al.] // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). 2013. Vol. 3, Iss. 2. P. 788–792. ISSN: 2249-6645.
12. Семченко, Н. И. Коррозионное поведение аустенитных нержавеющей сталей после электролитно-плазменного полирования / Н. И. Семченко, А. Ю. Королев // IV Междунар. симп. по теоретич. и прикл. плазмохимии, 13–18 мая 2005 г., Иваново, Россия: сб. тр. Иваново: Ивановский гос. хим.-технол. ун-т., 2005. Т. 2. С. 406–409.
13. Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхностного слоя стали 12X18H10T / И. В. Фомихина [и др.] // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2008. № 3. С. 24–29.
14. Калашников, С. Г. Электричество / С. Г. Калашников. М.: Наука, 1985. 576 с.
15. Дьяконов, В. П. *Mathematica 5/6/7*. Полное руководство / В. П. Дьяконов. М.: «ДМК Пресс», 2009. 624 с.
5. Alekseev Yu. G., Kosobutskii A. A., Korolev A. Yu., Niss V. S., Kucheryavyi V. D., Povzhik A. A. (2005) Peculiar Features in Dimensional Processing of Metal Products while Using Electrolytic-Plasma Method. *Litio i Metallurgiya = Foundry and Metallurgy*, (4), 188–195 (in Russian).
6. Alekseev Yu., Korolev A., Parshuta A., Niss V. (2012) Model for Metal Removal in Electrolyte-Plasma Treatment of Cylindrical Surfaces. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (3), 3–6 (in Russian).
7. Alekseev Yu. G., Korolev A. Yu., Minchenya V. T., Niss V. S., Parshuta A. E., Khrustalev B. M. (2015) *Combined Technology for Manufacturing of Flexible Ultrasonic Tool Concentrators*. Minsk, Belarusian National Technical University. 203 (in Russian).
8. Alekseev Yu. G., Korolev A. Yu., Niss V. S., Parshuta A. E. (2016) Electrolytic-Plasma Treatment of Inner Surfaces in Tubular Products. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 15 (1), 61–68 (in Russian). DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-1-61-68.
9. Alekseev Y., Isaevich L., Korolev A., Niss V. (2012) The effect of Electrolyte-Plasma Treatment in the Process of Deformative Hardening by Drawing on Strength Properties of Steel 12X18H9. *Vestnik PGU. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye Nauki = Vestnik of PSU Series B. Industry. Applied Sciences*, (11), 85–90 (in Russian).
10. Isaevich L. A., Alekseev Yu. G., Korolev A. Yu. (2005) Investigation of Process Pertaining to Production of High-Strength Wire from 12X18H10T-Steel while Using Drawing with Electrolytic-Plasma Surface Treatment. *Vestnik BNTU [Bulletin Belarusian National Technical University]*, (6), 30–33 (in Russian).
11. Vaňa D., Podhorský Š., Hurajt M., Hanzen V. (2013) Surface Properties of the Stainless Steel X10 CrNi 18/10 after Application of Plasma Polishing in Electrolyte. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 3 (2), 788–792.
12. Semchenko N. I., Korolev A. Yu. (2005) Corrosion Behavior of Austenitic Stainless Steel after Electrolyte-Plasma Polishing. *IV Mezhdunar. Simp. po Teoretich. i Prikl. Plazmohimii, 13–18 maya 2005 g., Ivanovo, Rossiya: sb. tr. T. 2 [4th International Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry, May 13–18, 2005. Ivanovo, Russia: Collection of Research Papers. Vol. 2]. Ivanovo, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 406–409 (in Russian).*
13. Fomikhina I. V., Litovskaya Yu. O., Alekseev Yu. G., Korolev A. Yu., Niss V. S. (2008) Influence of Electrolytic-Plasma Treatment on Structure and Properties in Surface Layer of Authentic Stainless 12X18H10T-Steel. *Vestsi Natsionalnoy Akademii Navuk Belarusi. Ser. Fiz.-Tekhn. Navuk = Bulletin of National Academy of Science of Belarus. Series of Physical and Technical Sciences*, (3), 24–29 (in Russian).
14. Kalashnikov S. G. (1985) *Electricity*. Moscow, Nauka Publ. 576 (in Russian).
15. Diakonov V. P. (2009) *Mathematica 5/6/7. Complete Guide*. Moscow, Publishing House “DMK Press”. 624 (in Russian).

Поступила 18.04.2017

Подписана в печать 21.06.2017

Опубликована онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. Kosobutsky A. A. (2004) *Physical and Mechanical Properties and Electro-Polishing Processes in Materials Being in Strong Electrostatic and Electromagnetic Fields*. Research Report (Final). No ГР 20022618. Minsk, Belarusian National Technical University. 61 (in Russian, Unpublished).
2. Aliakseyeu Yu., Korolyov A., Bezyazychnaya A. (2006) Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces. *CO-MAT-TECH-2006: Proceeding of the Abstracts 14 International Scientific Conference, Slovak University of Technology, 19–20 oct. 2006*. Slovakia, Trnava, 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. *Procedia CIRP*, 42, 503–507. DOI: 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.

Received: 18.04.2017

Accepted: 21.06.2017

Published online: 29.09.2017