

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ****TECHNICAL SCIENCE**

УДК 621.9.047.7

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-4-344-352>

Поступило в редакцию 23.05.2024

Received 23.05.2024

**А. Ю. Королёв<sup>1</sup>, В. А. Томило<sup>2</sup>, В. С. Нисс<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Научно-технологический парк Белорусского национального технического университета «Политехник»,  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАДИИ ФОРМИРОВАНИЯ  
ПАРОГАЗОВОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ**

(Представлено академиком В. В. Клубовичем)

**Аннотация.** Представлены результаты исследования энергетических характеристик и теплофизического состояния в стадии формирования парогазовой оболочки в процессе электролитно-плазменной обработки. Стадия формирования парогазовой оболочки характеризуется интенсивным нагревом прианодного слоя, переходом в неразвитое пузырьковое кипение с высокой мощностью тепловыделения, возникновением кризиса кипения и переходом в пленочный режим с низкой мощностью тепловыделения. При этом на аноде протекает традиционный электрохимический процесс, который сопровождается растворением поверхностного слоя. Установлены зависимости, характеризующие влияние параметров электролитно-плазменной обработки на удельную мощность и удельную энергию стадии формирования парогазовой оболочки. Полученные результаты позволяют оптимизировать параметры новых эффективных процессов электролитно-плазменной обработки в управляемых импульсных режимах, при которых в пределах одного импульса миллисекундной длительности реализуется как электрохимическая (формирование парогазовой оболочки), так и электролитно-плазменная стадии.

**Ключевые слова:** электролитно-плазменная обработка, парогазовая оболочка, плотность тока, удельная мощность, прианодный слой, кипение

**Для цитирования.** Королёв, А. Ю. Энергетические характеристики стадии формирования парогазовой оболочки при электролитно-плазменной обработке / А. Ю. Королёв, В. А. Томило, В. С. Нисс // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2024. – Т. 68, № 4. – С. 344–352. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-4-344-352>

**Aleksandr Yu. Korolyov<sup>1</sup>, Vyacheslav A. Tomilo<sup>2</sup>, Vladimir S. Niss<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Republican Innovative Unitary Enterprise «Scientific and Technological Park of the Belarusian National Technical University «Polytechnic», Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

**ENERGY CHARACTERISTICS OF THE VAPOR-GAS SHELL FORMATION STAGE  
DURING ELECTROLYTE-PLASMA TREATMENT**

**Abstract.** The article presents the results on energy characteristics and the thermophysical state in the vapor-gas shell formation stage during electrolyte-plasma treatment. The vapor-gas shell formation stage is characterized by intense heating of the anode layer, a transition to undeveloped bubble boiling with high heat release capacity, boiling crisis emergence, and by a transition to the film mode with low heat release capacity. At the same time, a traditional electrochemical process occurs on the anode, which is accompanied by dissolving the surface layer. Dependences characterizing the influence of electrolyte-plasma treatment parameters on the specific power and specific energy of the vapor-gas shell formation stage are established. The obtained results allow optimizing the parameters of new effective processes of electrolyte-plasma treatment in controlled pulse modes, at which both electrochemical (vapor-gas shell formation) and electrolyte-plasma stages are realized within one pulse of millisecond duration.

**Keywords:** electrolyte-plasma treatment, vapor-gas shell, current density, specific power, near-anode layer, boiling

**For citation.** 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>

**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 с целью повышения физико-механических и химических свойств поверхности [1], подготовки поверхности для нанесения покрытий [2].

Другими направлениями применения технологии ЭПО являются: размерная обработка ответственных длинномерных изделий [3], полирование и очистка внутренних поверхностей длинномерных трубчатых изделий [4], обработка поверхности с целью удаления инородных включений и снижения плотности дислокаций [5].

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;

высокая экологическая безопасность по сравнению с классическим электрохимическим полированием за счет применения электролитов на основе водных растворов солей общей концентрацией не более 5 %;

возможность обработки деталей и изделий сложной формы;

повышение коррозионной стойкости поверхности [6].

Формирование устойчивой парогазовой оболочки (ПГО) является неотъемлемым условием успешного протекания процесса ЭПО независимо от обрабатываемого материала, режима и применяемого электролита. В зависимости от способа погружения анода в электролит существует две схемы обработки: с плавным погружением анода, находящегося под напряжением, и с подачей напряжения на предварительно погруженный анод. При плавном погружении поляризованного анода ПГО возникает вокруг его узкого участка поверхности, граничащего в данный момент с поверхностью электролита. При подаче напряжения на предварительно погруженный в электролит анод образование ПГО происходит одновременно на всей его поверхности. Однако из-за высокой нагрузки на источник питания на практике применяют, как правило, первую схему.

Возможность формирования ПГО и длительность возникающих при этом фаз определяются параметрами электрохимической системы, такими как размеры анода и катода, состав и свойства электролита, электрические и тепловые условия. Представление о кинетике формирования ПГО и протекающих при этом тепловых и электрических процессах открывает возможности для разработки новых методов обработки поверхности на основе ЭПО, создания моделей процесса, установления оптимальных технологических параметров обработки.

В установившемся режиме ЭПО теплофизическое состояние является аналогом пленочного кипения, при котором существует устойчивая поверхность раздела жидкость–пар [7]. При этом присутствует тепловой поток в электролит, плотность которого достаточна для обеспечения устойчивости этой границы [8]. Энергия проходящего тока выделяется в элементе с максимальным электрическим сопротивлением, т. е. в ПГО [9]. Такое состояние является неразвитым кипением в недогретой до температуры насыщения жидкости.

Для возникновения пленочного кипения в процессе ЭПО необходимо обеспечить выделение энергии в прианодном слое электролита, достаточной для доведения его температуры до температуры кипения и превращения в пар. Поскольку в начальный момент при подаче напряжения поверхность анода имеет прямой контакт с электролитом, то прианодный слой представляет собой теплоотдающую поверхность и является источником джоулева тепла.

За счет высокого напряжения, при котором реализуется процесс ЭПО, в электролитической системе формируется плотность тока, на порядки превышающая плотность тока в установившемся электролитно-плазменном режиме, что приводит к вскипанию прианодного слоя за короткий промежуток времени. Одновременно на аноде протекает традиционный электрохими-

ческий процесс, который сопровождается растворением поверхностного слоя в соответствии с законом Фарадея, согласно которому величина съема металла пропорциональна плотности тока и длительности электролиза.

В условиях ЭПО в стационарном режиме с общей продолжительностью 3–5 мин стадия формирования ПГО не вносит значимого вклада в общий съем металла и энергетические характеристики процесса. Однако при создании новых эффективных процессов на основе управляемых импульсных режимов ЭПО, когда в пределах одного импульса миллисекундной длительности реализуется как электрохимическая (формирование ПГО), так и электролитно-плазменная стадии [10], вклад стадии формирования ПГО становится существенным. Высокая эффективность импульсных режимов ЭПО достигается за счет основного интенсивного съема металла при реализации электрохимической стадии с высоким значением силы тока и оптимизации продолжительности электролитно-плазменной стадии, при которой обеспечивается высокое качество поверхности. С целью оптимизации энергетических затрат и нагрузок на источники питания при реализации таких процессов необходимо иметь представление о значениях мощности и удельной энергии стадии формирования ПГО, а также о характере влияния на них параметров процесса ЭПО.

**Материалы и методы исследования.** Для экспериментальных исследований влияния параметров ЭПО на величину энергии, выделяемую в стадии формирования ПГО, и на ее длительность, использовался регулируемый от 0 до 300 В источник питания мощностью 12 кВт, позволяющий формировать импульсы тока заданной длительности. Основным элементом схемы источника питания является ключ на транзисторе IGBT типа MIAA-HB12MA-200N с максимальным напряжением исток-сток 1200 В и током стока 200 А. Генератор позволяет формировать импульсы длительностью от 0,05 мс с коэффициентом заполнения 5–95 %.

Анодом являлись отрезки проволоки из коррозионностойкой стали AISI 321 диаметром 2,0 мм. Обработке подвергались только участки образцов длиной 10 мм. Остальная часть образцов защищалась втулкой из фторопласта. Обработка образцов выполнялась в электрохимической ячейке с катодом из коррозионностойкой стали AISI 304. В качестве электролита использовался водный раствор сульфата аммония концентрацией 3, 6 и 9 %, что соответствовало значениям удельной электропроводности при температуре 20 °С – 3,5, 7,0 и 10,5 Ом<sup>-1</sup>м<sup>-1</sup>. Удельная электропроводность электролита измерялась кондуктометром HANNA HI8733. Исследования выполняли в электролите при значениях температуры 60, 75 и 90 °С. Образцы обрабатывались при напряжении 130–300 В. Форма импульсов напряжения и тока в стадии формирования ПГО и ее длительность фиксировались с помощью цифрового осциллографа OWON XDS 3102A.

Мощность стадии формирования ПГО определялась методом дискретного интегрирования по результатам анализа осциллограмм тока и напряжения. Активная мощность в цепи несинусоидального периодического тока равна среднему за период значению мгновенной мощности [11]

$$W = \frac{1}{T} \int_0^T U(\tau)I(\tau)d\tau, \quad (1)$$

где  $T$  – период следования импульсов.

Применительно к удельной мощности стадии формирования ПГО (1) представим в виде

$$w = \frac{1}{\tau_{\text{ПГО}}} \int_0^{\tau_{\text{ПГО}}} U(\tau)i(\tau)d\tau.$$

Тогда удельную энергию стадии формирования ПГО определим по формуле

$$q_{\text{ПГО}} = w\tau_{\text{ПГО}} = \int_0^{\tau_{\text{ПГО}}} U(\tau)i(\tau)d\tau. \quad (2)$$

Для установления мгновенных значений напряжения  $U(\tau)$  и силы тока  $I(\tau)$  участок осциллограммы, соответствующий стадии формирования ПГО, разбивался на десять равных по времени интервалов. Средние значения ординат полученных интервалов напряжения и тока определялись как отношение площади, занимаемой каждым интервалом к его длительности, умноженное

на соответствующий масштабный коэффициент. Мгновенные значения мощности определены путем перемножения ординаты интервала напряжения на соответствующую ей ординату интервала тока.

**Результаты и их обсуждение.** Примеры осциллограмм начала процесса ЭПО, полученные при подаче напряжения на предварительно погруженный в электролит анод, с увеличенным коэффициентом горизонтальной развертки, позволяющим проанализировать тепловые и электрические процессы на участке, соответствующем стадии формирования ПГО, представлены на рис. 1.

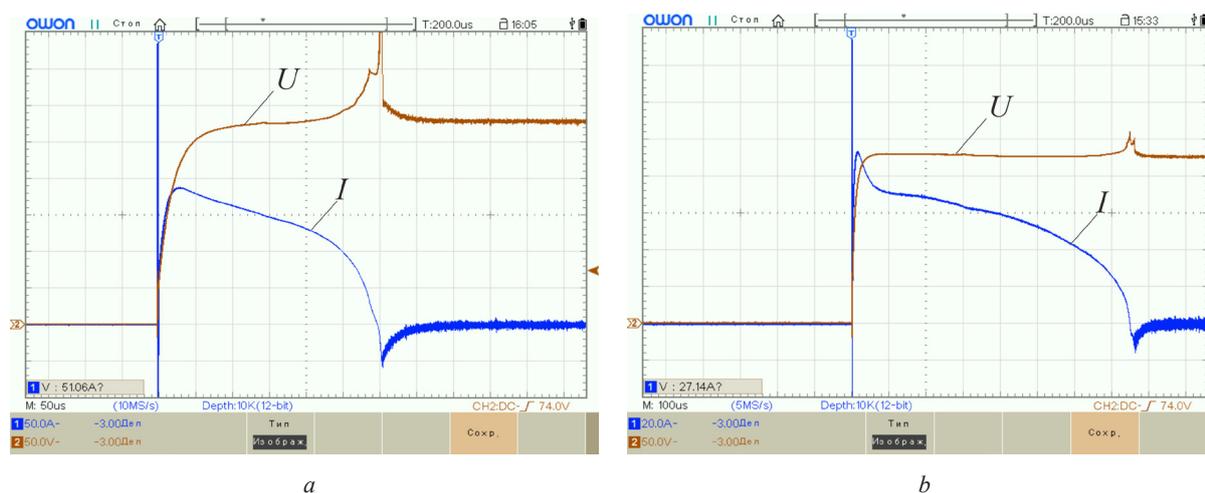


Рис. 1. Начальные участки осциллограмм процесса электролитно-плазменной обработки: напряжение 300 В, температура электролита 90 °С, концентрация 6 % (а); напряжение 240 В, температура электролита 75 °С, концентрация 3 % (б)

Fig. 1. The initial sections of oscillograms of the electrolyte-plasma treatment process: voltage 300 V, electrolyte temperature 90 °C, concentration 6 % (a); voltage 240 V, electrolyte temperature 75 °C, concentration 3 % (b)

Анализ полученных осциллограмм позволяет выделить следующие фазы формирования ПГО (рис. 2).

1. В начальный момент происходит быстрое (за 20–25 мкс) нарастание напряжения до максимального значения. В это время электролит имеет прямой контакт с поверхностью анода, что приводит к пропорциональному росту плотности тока по закону Ома. В этой фазе происходит интенсивный нагрев прианодного слоя электролита до температуры насыщения за счет выделения в нем джоулева тепла.

2. После достижения максимального значения плотность тока начинает плавно снижаться. Это связано с повышением электрического сопротивления из-за перегрева прианодного слоя электролита до температуры, существенно превышающей температуру насыщения, возникновения на поверхности пузырькового кипения с дальнейшим постепенным ростом парогазовых пузырей и увеличением толщины кипящего слоя.

3. Далее в отдельных местах поверхности возникают «сухие» пятна (участки, на которых электролит не имеет прямого контакта с поверхностью), их число и размеры непрерывно растут, что приводит к резкому повышению электрического сопротивления и, соответственно, к снижению плотности тока.

4. Вся поверхность анода покрывается сплошной пленкой пара и газа, оттесняющей электролит от поверхности. Происходит переход от пузырькового к пленочному кипению с формированием ПГО – электролитно-плазменный режим.

Таким образом, теплофизическое состояние в стадии формирования ПГО характеризуется как интенсивный нагрев прианодного слоя с переходом в неразвитое пузырьковое кипение с высокой мощностью тепловыделения, с дальнейшим возникновением кризиса кипения и переходом в пленочный режим с низкой мощностью тепловыделения.

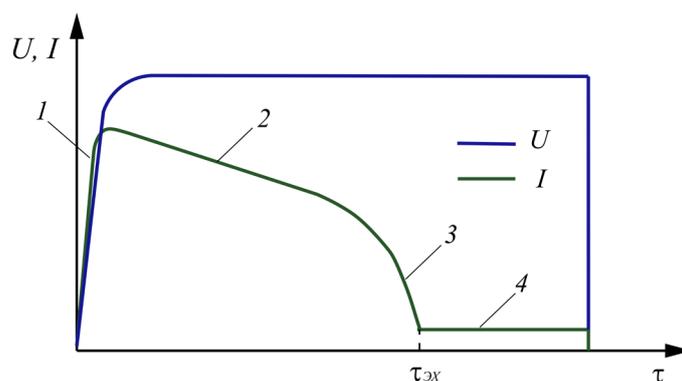


Рис. 2. Фазы в процессе формирования парогазовой оболочки

Fig. 2. Phases in the process of formation of a vapor-gas shell

Характерные графики распределения мгновенной удельной мощности в пределах стадии формирования ПГО при различных параметрах ЭПО представлены на рис. 3. Полученные графики повторяют профили осциллограмм тока (рис. 1, *b*), за исключением более пологого начального участка, на котором рост напряжения сопровождается увеличением плотности тока. Сопоставление таких графиков наглядно демонстрирует характер влияния параметров ЭПО на распределение удельной мощности (плотности тока) в пределах стадии формирования ПГО и ее длительность.

На рис. 3, *a* представлено распределение удельной мощности в пределах стадии формирования ПГО в процессе обработки при напряжении 190 В в электролите с концентрацией 6 % для различных значений его температуры. Изменение температуры электролита не оказывает существенного влияния на максимальное значение удельной мощности в стадии формирования ПГО  $w_{\max}$ . Отмечается незначительное увеличение  $w_{\max}$  с 24,3 до 28,2 кВт/см<sup>2</sup> при увеличении температуры электролита с 60 до 90 °С. Длительность стадии формирования ПГО  $\tau_{\text{ПГО}}$  имеет обратную зависимость от температуры электролита – с увеличением температуры электролита ее величина уменьшается. Так, при повышении температуры электролита с 60 до 90 °С длительность  $\tau_{\text{ПГО}}$  уменьшается с 0,60 до 0,46 мс.

Более значимое влияние на удельную мощность и длительность стадии формирования ПГО оказывают напряжение и концентрация электролита. Характер влияния напряжения на изменение  $w_{\max}$  и  $\tau_{\text{ПГО}}$  позволяют оценить графики на рис. 3, *b*, построенные при температуре электролита 90 °С с концентрацией 6 %. Повышение напряжения от 130 до 300 В приводит к увеличению максимального значения удельной мощности  $w_{\max}$  в пять раз (с 14,1 до 66,3 кВт/см<sup>2</sup>). Длительность стадии формирования ПГО при этом уменьшается с 0,62 до 0,31 мс. Аналогичный характер имеет график распределения мгновенной удельной мощности для различных значений концентрации электролита (рис. 3, *c*). При обработке в электролите с температурой 90 °С при напряжении 300 В повышение концентрации с 3 до 9 % обеспечивает увеличение  $w_{\max}$  с 41,2 до 85,2 кВт/см<sup>2</sup> и уменьшение  $\tau_{\text{ПГО}}$  с 0,45 до 0,17 мс.

Характер установленных зависимостей соответствует традиционным представлениям о влиянии параметров электрохимического процесса на плотность тока и удельную мощность обработки. В электрохимических процессах повышение напряжения, удельной проводимости (или концентрации) и температуры электролита приводят к росту плотности тока. Это подтверждает электрохимическую природу начальной фазы стадии формирования ПГО в процессе ЭПО.

Зависимости удельной энергии стадии формирования ПГО  $q_{\text{ПГО}}$  от параметров ЭПО, полученные по результатам расчета по (2), представлены на рис. 4. Удельная энергия  $q_{\text{ПГО}}$  имеет прямую зависимость только от величины напряжения. При различных значениях концентрации электролита повышение напряжения от 130 до 300 В приводит к увеличению удельной энергии

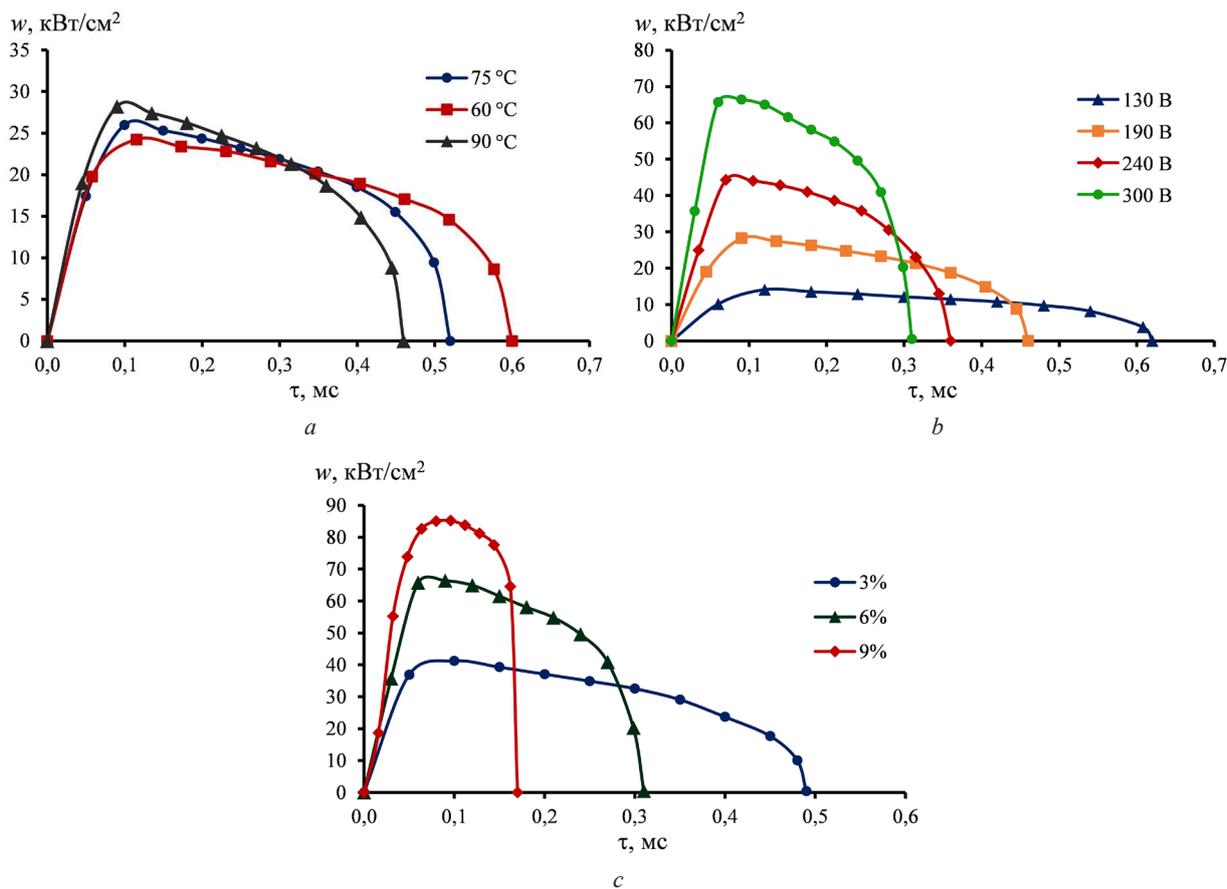


Рис. 3. Влияние параметров электролитно-плазменной обработки на изменение мгновенной удельной мощности в пределах стадии формирования парогазовой оболочки: при различных значениях температуры ( $C = 6\%$ ,  $U = 190\text{ В}$ ) (a); при различных значениях напряжения ( $C = 6\%$ ,  $T_{эл} = 90\text{ °C}$ ) (b); при различных значениях концентрации ( $T_{эл} = 90\text{ °C}$ ,  $U = 300\text{ В}$ ) (c)

Fig. 3. Influence of electrolyte-plasma treatment parameters on the change in instantaneous specific power within the stage of formation of a vapor-gas shell: at different temperature values ( $C = 6\%$ ,  $U = 190\text{ V}$ ) (a); at different voltage values ( $C = 6\%$ ,  $T_{el} = 90\text{ °C}$ ) (b); at different concentration values ( $T_{el} = 90\text{ °C}$ ,  $U = 300\text{ V}$ ) (c)

стадии формирования ПГО с 5,1–7,2 до 15,4–19,8 Дж/см<sup>2</sup>. Повышение концентрации электролита, так же, как и увеличение его температуры способствует снижению удельной энергии  $q_{ПГО}$ . Однако влияние этих параметров менее значительно по сравнению с влиянием напряжения. Так, повышение концентрации электролита с 3 до 9% обеспечивает снижение  $q_{ПГО}$  с 7,2–19,8 до 5,1–15,4 Дж/см<sup>2</sup>, а увеличение температуры электролита с 60 до 90 °C снижает  $q_{ПГО}$  с 6,9–12,6 до 14,7–15,5 Дж/см<sup>2</sup>.

Удельная энергия стадии формирования ПГО является важным параметром, который необходимо учитывать при разработке импульсных режимов ЭПО. С одной стороны, для снижения энергетических затрат необходимо стремиться к снижению  $q_{ПГО}$ . С другой стороны, поскольку в импульсных режимах часть энергии расходуется на электрохимический процесс с большим съемом металла, то для повышения эффективности процесса обработку целесообразно выполнять при высоких значениях  $q_{ПГО}$ . Таким образом, оптимальные значения удельной энергии необходимо устанавливать к конкретному технологическому процессу в зависимости от преобладания электрохимической или электролитно-плазменной составляющей. Поэтому режимы с высокими значениями удельной энергии  $q_{ПГО}$  (с преобладанием электрохимической составляющей) целесообразно использовать в процессах, при которых необходим большой съем металла при малой продолжительности обработки.

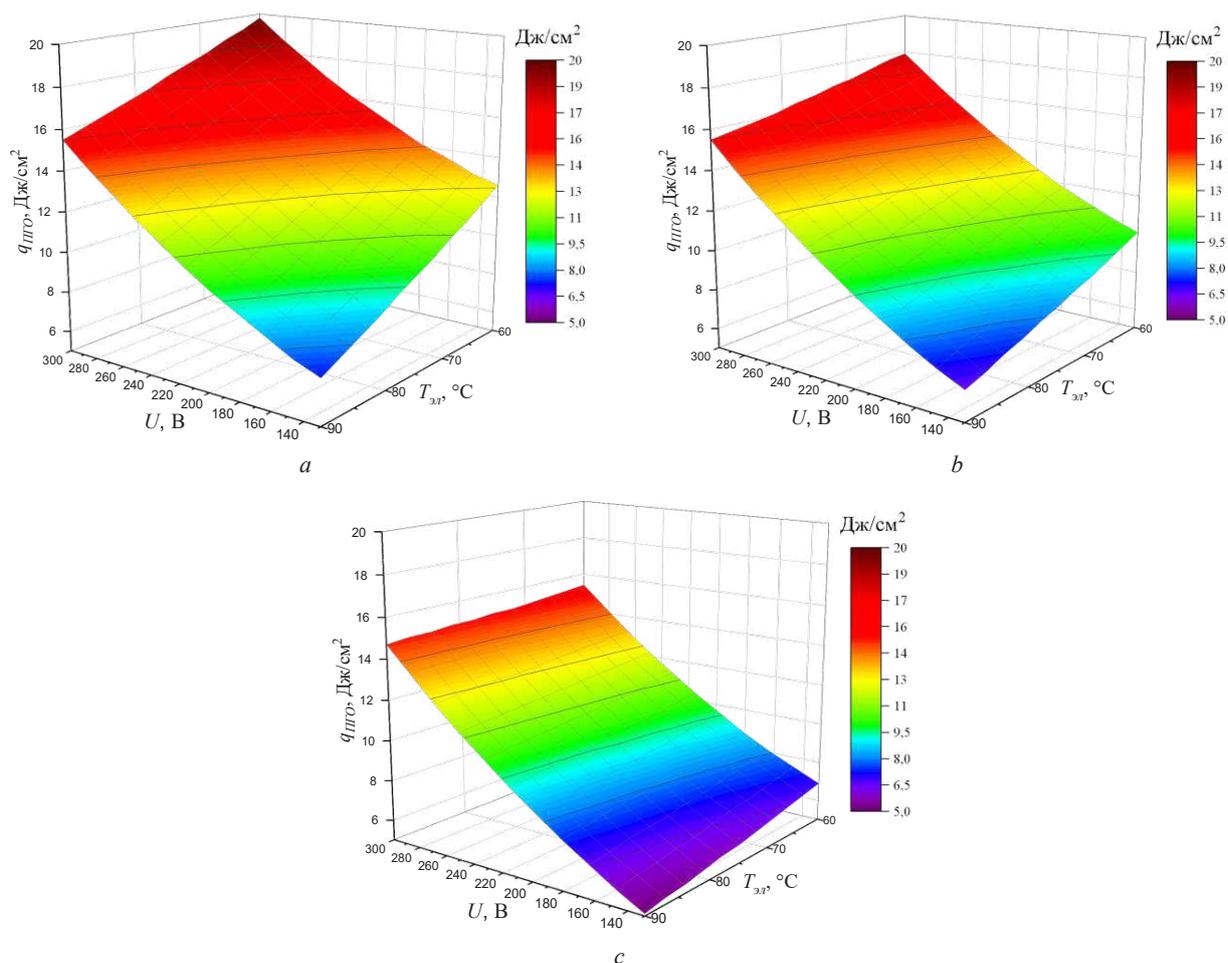


Рис. 4. Влияние параметров электролитно-плазменной обработки на энергию стадии формирования парогазовой оболочки при различных значениях концентрации электролита: 3 % (a); 6 % (b); 9 % (c)

Fig. 4. Influence of electrolyte-plasma treatment parameters on the energy of the stage of formation of a vapor-gas shell at different values of electrolyte concentration: 3 % (a); 6 % (b); 9 % (c)

**Заключение.** Теплофизическое состояние в стадии формирования парогазовой оболочки в процессе электролитно-плазменной обработки характеризуется как интенсивный нагрев прианодного слоя с переходом в неразвитое пузырьковое кипение с высокой мощностью тепловыделения, с дальнейшим возникновением кризиса кипения и переходом в пленочный режим с низкой мощностью тепловыделения. Стадия формирования парогазовой оболочки в процессе электролитно-плазменной обработки включает следующие фазы: интенсивный рост напряжения и плотности тока до максимальных значений; плавное снижение тока из-за повышения электрического сопротивления вследствие кипения и испарения электролита в прианодном слое; резкое снижение плотности тока из-за перехода в режим пленочного кипения.

Установлены зависимости, характеризующие влияние параметров электролитно-плазменной обработки на удельную мощность и удельную энергию стадии формирования парогазовой оболочки. В исследованных диапазонах параметров процесса электролитно-плазменной обработки наиболее существенное влияние на удельную мощность стадии формирования парогазовой оболочки оказывают напряжение и концентрация электролита. Удельная мощность в пределах стадии формирования парогазовой оболочки может достигать 85,2 кВт/см<sup>2</sup> при длительности 0,17 мс (температура электролита – 90 °С, концентрация электролита 9 %, напряжение 300 В). Значение удельной энергии, затрачиваемой на формирование парогазовой оболочки, составляет от 5,1 до 19,8 Дж/см<sup>2</sup>.

Полученные результаты позволяют оптимизировать параметры процессов электролитно-плазменной обработки в управляемых импульсных режимах, при которых в пределах одного импульса миллисекундной длительности реализуется как электрохимическая (формирование ПГО), так и электролитно-плазменная стадии. Режимы с высокими значениями удельной энергии (с преобладанием электрохимической составляющей) целесообразно использовать в процессах, при которых необходим большой съем металла при малой продолжительности обработки.

### Список использованных источников

1. Aliakseyeu, Yu. Electrolyte-plasma treatment of metal materials surfaces / Yu. Aliakseyeu, A. Korolyov, A. Bezyazychnaya // *CO-MAT-TECH 2006: Proceeding of the Abstracts of 14th International Scientific Conference*. – Trnava, 2006. – P. 6.
2. Особенности процессов размерной обработки металлических изделий электролитно-плазменным методом / Ю. Г. Алексеев [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2005. – № 4. – С. 188–195.
3. Комбинированная технология изготовления гибких ультразвуковых концентраторов-инструментов / Ю. Г. Алексеев [и др.]; под общ. ред. акад. НАН Беларуси Б. М. Хрусталёва. – Минск, 2015. – 203 с.
4. Электролитно-плазменная обработка внутренних поверхностей трубчатых изделий / Ю. Г. Алексеев [и др.] // *Наука и техника*. – 2016. – № 1. – С. 61–68.
5. Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхностного слоя стали 12X18H10T / И. В. Фомихина [и др.] // *Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук*. – 2008. – № 3. – С. 24–29.
6. Семченко, Н. И. Коррозионное поведение аустенитных нержавеющей сталей после электролитно-плазменного полирования / Н. И. Семченко, А. Ю. Королёв // *IV Междунар. симпозиум по теорет. и приклад. плазмохимии (13–18 мая 2005 г., Иваново, Россия): сб. тр.* – Иваново, 2005. – Т. 2. – С. 406–409.
7. Особенности теплообмена при анодной электролитно-плазменной обработке цилиндрических деталей / И. Г. Дьяков [и др.] // *Электронная обработка материалов*. – 2014. – Т. 50, № 4. – С. 65–75.
8. Белкин, П. Н. Тепловые потоки при нагреве анода в водных растворах / П. Н. Белкин, А. К. Товарков // *Вестн. КГУ им. Н. А. Некрасова*. – 2001. – № 3. – С. 8–12.
9. Белкин, П. Н. Анодный нагрев в водных растворах / П. Н. Белкин // *Вестн. Костромского гос. пед. ун-та*. – 1997. – № 4. – С. 55–58.
10. 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>
11. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке [и др.]. – 5-е изд., перераб. – М., 1989. – 528 с.

### References

1. Aliakseyeu Yu., Korolyov A., Bezyazychnaya A. Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces. *CO-MAT-TECH 2006: Proceeding of the Abstracts of 14th International Scientific Conference*. Trnava, 2006, pp. 6.
2. Alekseev Yu. G., Kosobutsky A. A., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Kucheryavyi D. V., Povzhik A. A. Features of the processes of dimensional treatment of metal products using the electrolyte-plasma method. *Lit'e i metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*, 2005, no. 4, pp. 188–195 (in Russian).
3. Alekseev Yu. G., Korolev A. Yu., Minchenya V. T., Niss V. S., Parshuto A. E., Khrustalev B. M. *Combined Technology for Manufacturing of Flexible Ultrasonic Concentrators-Instruments*. Minsk, 2015. 203 p. (in Russian).
4. Alekseev Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuta A. E. Electrolytic-Plasma Treatment of Inner Surface in Tubular Products. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 2016, no. 1, pp. 61–68 (in Russian).
5. Fomikhina I. V., Lisovskaya Yu. O., Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S. Effect of electrolytic-plasma treatment on the structure and properties of the surface layer of authentic stainless steel. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2008, vol. 3, pp. 24–29 (in Russian).
6. Semchenko N. I., Korolyov A. Yu. Corrosion behavior of austenitic stainless steels after electrolytic plasma polishing. *IV Mezhdunarodnyi simpozium po teoreticheskoi i prikladnoi plazmokhimii (13–18 maya 2005 g., Ivanovo, Rossiya): sbornik trudov [IV International Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry (13–18 May 2005, Ivanovo, Russia): collection of papers]*. Ivanovo, 2005, vol. 2, pp. 406–409 (in Russian).
7. D'yakov I. G., Belkin V. S., Shadrin S. Y., Belkin P. N. Peculiarities of heat transfer at anodic plasma electrolytic treatment of cylindrical pieces. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2014, vol. 50, no. 4, pp. 346–355. <https://doi.org/10.3103/s1068375514040061>
8. Belkin P. N., Tovarkov A. K. Heat flows when heating the anode in aqueous solutions. *Vestnik KGU im. N. A. Nekrasova [Bulletin of Kostroma State University N. A. Nekrasova]*, 2001, no. 3, pp. 8–12 (in Russian).
9. Belkin P. N. Anodic heating in aqueous solutions. *Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta [Bulletin of the Kostroma State Pedagogical University]*, 1997, no. 4, pp. 55–58 (in Russian).
10. Korolyov A. Yu., Aliakseyeu Yu. G., Niss V. S., Parshuto A. E. Electrolyte-Plasma Treatment in Controlled Pulse Modes. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 2021, vol. 20, no. 4, pp. 279–286 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-279-286>
11. Zeweke G. V., Ionkin P. A., Netushil A. V., Strakh S. V. *Fundamentals of circuit theory*. Moscow, 1989. 528 p. (in Russian).

**Информация об авторах**

*Королёв Александр Юрьевич* – канд. техн. наук, доцент, заведующий сектором. Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» (ул. Я. Коласа, 24, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: korolyov@park.bntu.by. ORCID: 0000-0002-0841-1272.

*Томило Вячеслав Анатольевич* – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой. Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: stamila@rambler.ru.

*Нисс Владимир Семёнович* – канд. техн. наук, доцент, заведующий центром. Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: niss@park.bntu.by.

**Information about the authors**

*Korolyov Aleksandr Yu.* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Sector. Scientific and Technological Park BNTU «Polytechnic» (24, Ya. Kolas Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: korolyov@park.bntu.by. ORCID: 0000-0002-0841-1272.

*Tomilo Vyacheslav A.* – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department. Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: stamila@rambler.ru.

*Niss Vladimir S.* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Center. Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: niss@park.bntu.by.