

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-109-117>

УДК 621.9.047.7

Влияние анодных режимов обработки в электролитах на съём металла и выход по току

Канд. техн. наук, доц. А. Ю. Королёв¹⁾

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

Реферат. Установлено влияние анодных режимов (электрохимический, коммутационный, электролитно-плазменный) при обработке стали AISI 321 в водном растворе сульфата аммония концентрацией 5 %, широко применяемом в практике электролитно-плазменной обработки коррозионноустойчивых сталей, на съём металла, выход по току и затрачиваемую удельную энергию. Наибольший съём металла отмечается на границе электрохимического и коммутационного режимов, а также в области коммутационного режима. В зависимости от температуры электролита максимальный съём при этом превышает значения, соответствующие электролитно-плазменному режиму, в 6–8 раз. В области значений напряжения, соответствующей электролитно-плазменному режиму, коэффициент выхода металла по току η существенно выше, чем при значениях напряжения, соответствующих электрохимическому и коммутационному режимам. В зависимости от температуры электролита значения η находятся в следующих диапазонах: в электролитно-плазменном режиме – 0,40–0,62; в коммутационном – 0,18–0,24; в электрохимическом – 0,16–0,24. В электролитно-плазменном режиме (210–330 В) максимум коэффициента η обеспечивается в области температуры электролита 70–80 °С. Электролитно-плазменный режим характеризуется большими энергозатратами на единицу массы удаленного металла ($q/\Delta m$) по сравнению с электрохимическим режимом. Так, при температуре 80 °С в электрохимическом режиме в диапазоне напряжения 10–70 В параметр $q/\Delta m$ принимает значения 0,04–0,31 Вт·ч/(см²·мг), а в электролитно-плазменном режиме (120–330 В) – 0,14–0,50 Вт·ч/(см²·мг). При температуре 90 °С в электролитно-плазменном режиме значение параметра $q/\Delta m$ изменяется от 0,26 до 0,63 Вт·ч/(см²·мг). Полученные результаты являются основой для создания эффективных комплексных процессов повышения качества поверхности и размерной обработки, при которых в одной стадии совмещается как электролитно-плазменный, так и электрохимический режимы обработки. Такая схема обработки позволяет использовать преимущества каждого из анодных режимов: интенсивный съём металла при низких энергозатратах в электрохимическом режиме и полирование с достижением высокого качества поверхности в электролитно-плазменном режиме.

Ключевые слова: анодная обработка, электролитно-плазменный режим, коммутационный режим, электрохимический режим, плотность тока, съём металла, выход по току

Для цитирования: Королёв, А. Ю. Влияние анодных режимов обработки в электролитах на съём металла и выход по току / А. Ю. Королёв // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 2. С. 109–117. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-109-117>

Effect of Anodic Treatment Modes in Electrolytes on Metal Removal and Current Efficiency

A. Yu. Korolyov¹⁾

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

Abstract. The effect of anode modes (electrochemical, switching, electrolyte-plasma) in the treatment of AISI 321 steel in an aqueous solution of ammonium sulfate with a concentration of 5 %, which is widely used in the practice of electrolyte-plasma treatment of corrosion-resistant steels, on metal removal, current efficiency and specific energy spent, has been established. The greatest metal removal is observed at the border of the electrochemical and switching modes, as well as in the area of the switching mode. Depending on the electrolyte temperature, the maximum removal in this case exceeds the values

Адрес для переписки

Королёв Александр Юрьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 374-25-98
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 17 374-25-98
korolyov@park.bntu.by

corresponding to the electrolyte-plasma mode by 6–8 times. In the region of voltage values corresponding to the electrolyte-plasma mode, the coefficient of metal current efficiency η is significantly higher than at voltage values corresponding to electrochemical and switching modes. Depending on the electrolyte temperature, the values of η are in the following ranges: in electrolyte-plasma mode – 0.40–0.62; in switching – 0.18–0.24; in electrochemical – 0.16–0.24. In the electrolyte-plasma mode (210–330 V), the maximum coefficient η is provided in the region of the electrolyte temperature range of 70–80 °C. The electrolyte-plasma mode is characterized by high energy consumption per unit mass of removed metal ($q/\Delta m$) compared to the electrochemical mode. So, at a temperature of 80 °C in the electrochemical mode in the voltage range of 10–70 V, the parameter $q/\Delta m$ takes values of 0.04–0.31 W·h/(cm²·mg), and in an electrolyte-plasma mode (120–330 V) – 0.14–0.50 W·h/(cm²·mg). At a temperature of 90 °C in the electrolyte-plasma mode, the value of the parameter $q/\Delta m$ varies from 0.26 to 0.63 W·h/(cm²·mg). The obtained results are the basis for creating effective complex processes for improving surface quality and dimensional treatment, in which both electrolyte-plasma and electrochemical modes are combined in one stage. This treatment scheme allows to take advantage of each of the anode modes: intensive metal removal at low energy consumption in the electrochemical mode and polishing the surface with the achievement of high surface quality in the electrolyte-plasma mode.

Keywords: anodic treatment, electrolyte-plasma mode, switching mode, electrochemical mode, current density, metal removal, current efficiency

For citation: Korolyov A. Yu. (2025) Effect of Anodic Treatment Modes in Electrolytes on Metal Removal and Current Efficiency. *Science and Technique*. 24 (2), 109–117. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-109-117> (in Russian)

Введение

В качестве альтернативы существующим методам электрохимического полирования широко используется электролитно-плазменная обработка (ЭПО) [1, 2]. Метод обеспечивает полирование, удаление заусенцев и очистку поверхности изделий из металлических материалов [3, 4]. ЭПО по сравнению с механическим и электрохимическим полированием обладает рядом существенных преимуществ, таких как: высокая экологическая безопасность за счет применения электролитов на основе водных растворов солей концентрацией 3–5 %; возможность обработки деталей и изделий любой конфигурации; возможность получения зеркальной поверхности с высотой микронеровностей вплоть до $Ra = 0,01$ мкм; удаление в процессе обработки дефектного поверхностного слоя, что улучшает физико-механические и химические свойства поверхности; короткая продолжительность процесса полирования; существенное снижение ручного труда; возможность обработки высокотвердых и вязких материалов [4–6]. Производительность и экономическая эффективность технологических операций процесса ЭПО в 5–6 раз выше, чем при традиционном электрохимическом полировании в растворах кислот [7].

Общим недостатком ЭПО является большая энергоемкость, связанная, прежде всего, с высоким напряжением, которое требуется для поддержания стабильной парогазовой оболоч-

ки. В процессе ЭПО через парогазовую оболочку протекает ток сравнительно небольшой плотности. При этом его величина определяет производительность обработки или съем металла. Соответственно для повышения эффективности ЭПО (увеличения производительности и снижения энергопотребления) необходимо создать условия обработки, при которых достигается повышенная плотность тока с низкими энергозатратами. Причем такая обработка должна обеспечивать сохранение высокого качества формируемой поверхности.

Большой съем при относительно низком напряжении обеспечивается в электрохимической и (OA) и коммутационной областях (AB) вольт-амперной характеристики анодных режимов в электролитах (рис. 1).



Рис. 1. Вольт-амперная характеристика анодного процесса в электролите: OA – электрохимический режим; AB – коммутационный режим; BC – электролитно-плазменный режим

Fig. 1. Voltage-current characteristic of the anode process in the electrolyte: OA – electrochemical mode; AB – switching mode; BC – electrolyte-plasma mode

При этом значения напряжения, определяющие границы существования анодных режимов, зависят от тепловых и электрических условий, при которых они реализуются. При равных электрических параметрах эти границы определяются электропроводящими свойствами среды, которые в случае анодной обработки характеризуются составом и температурой применяемого электролита. Недостатком анодной обработки на таких режимах, при условии применения в качестве электролитов водных растворов солей концентрацией 3–5 %, является низкое качество формируемой поверхности.

Высокое качество поверхности с большим съемом металла при условии одностадийной обработки может быть достигнуто при совмещении в одном процессе электрохимического и электролитно-плазменного режима. Для этого необходимо создание электрических условий, при которых происходит возникновение нестационарных режимов [8–10], характеризующихся контролируемым кратковременным переходом из стационарного электролитно-плазменного режима в электрохимический режим, когда обеспечивается интенсивный съем металла с низким энергопотреблением. Таким образом, за счет использования нестационарных режимов становится возможным осуществление комплексного электрохимического и электролитно-плазменного воздействия на обрабатываемую поверхность и создание на их основе эффективных процессов повышения качества поверхности и размерной обработки.

Для разработки нестационарных процессов ЭПО необходимо иметь представление о влиянии анодных режимов и их характеристик на съем металла и выход по току, границах существования анодных режимов, а также величине энергии, которая затрачивается в этих режимах.

Оборудование и методы

Для выполнения исследований использовалась рабочая ванна из коррозионностойкой стали объемом 20 л. Стабилизация температуры электролита в ней выполнялась при помощи системы нагрева (встроенные ТЭНы) и системы охлаждения, состоящей из теплообменника, chillера и барботера. В качестве электролита использовался водный раствор сульфата аммония концентрацией 5 %. Температура электролита изменялась в диапазоне 50–90 °С с шагом 10 °С. Регулировка выходного напряжения источника питания вы-

полнялась с помощью трехфазного ЛАТРа в диапазоне от 0 до 330 В. Продолжительность обработки образцов составляла 3 мин. При этом для каждого из образцов фиксировался характер протекающего анодного режима: электрохимический, коммутационный или электролитно-плазменный.

Среднее значение силы тока в цепи электролит–анод при обработке образцов измерялось мультиметром Victor VC9808 с дискретностью 0,01 А. Масса образцов до и после обработки измерялась на аналитических весах OHAUS Pioneer PA 214C с дискретностью 0,1 мг.

В качестве образцов для выполнения исследований использовали отрезки проволоки из коррозионностойкой стали AISI 321 диаметром 2 мм длиной 40 мм. Для повышения точности определения съема металла и измерения силы тока обработка выполнялась при частичном погружении образцов в электролит на длину 20 мм. Таким образом, площадь обрабатываемой поверхности составляла 1,29 см². Участок образца, граничащий с поверхностью электролита, изолировался втулкой из фторопласта (рис. 2).

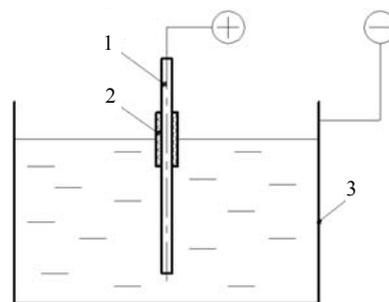


Рис. 2. Схема погружения образцов:
1 – образец (анод); 2 – изолирующая втулка;
3 – ванна с электролитом (катод)

Fig. 2. Sample immersion scheme:
1 – sample (anode); 2 – insulating bushing;
3 – bath with electrolyte (cathode)

Такая схема погружения позволяет локализовать обработку только на необходимом участке образца. Для крепления образца не требуется промежуточная оснастка, поверхность которой также участвует в анодном процессе и соответственно вносит дополнительный вклад в формирование общей силы тока. Наличие изолирующей втулки позволяет избежать пульсаций тока и дополнительного съема металла в области границы электролит–воздух вследствие колебаний

электролита и выхода из прианодной зоны образующейся парогазовой смеси.

Значение коэффициента выхода металла по току η рассчитывалось по формуле [11]

$$\eta = \frac{\Delta m}{\Delta m_{\text{расч}}}, \quad (1)$$

где Δm – фактическая масса удаленного металла; $\Delta m_{\text{расч}}$ – расчетное значение массы удаленного металла,

$$\Delta m_{\text{расч}} = kI\tau, \quad (2)$$

k – электрохимический эквивалент металла (для стали AISI 321 составляет $16,28 \cdot 10^{-3}$ г/(А·мин) [11]; I – измеренная сила тока в цепи электролит–анод; τ – продолжительность обработки.

Результаты исследований и их обсуждение

Полученные на основании экспериментальных данных зависимости плотности тока и съема металла от рабочего напряжения при различных значениях температуры электролита представлены на рис. 3. Зависимости съема металла и плотности тока хорошо согласуются друг с другом, что подтверждает корректность полученных результатов, поскольку обеспечивается соблюдение закона Фарадея. Температура электролита оказывает решающее влияние как на формируемую плотность тока, так и на границы областей возникновения анодных режимов. Так, при температуре электролита 50 °С максимальная плотность тока составляет 2,64 А/см², а при температуре 90 °С – 11,72 А/см². Съем ме-

талла при этом 25,1 и 108,9 мг/см² соответственно.

При температуре 50 °С электрохимический режим протекает в диапазоне значений рабочего напряжения от 0 до 80 В. В диапазоне от 80 до 210 В действует коммутационный режим. Стабильный электролитно-плазменный режим возникает при напряжении более 210 В. С увеличением температуры электролита область существования электрохимического режима незначительно расширяется. Так, если при температуре 70 °С граница перехода электрохимического режима в коммутационный по-прежнему соответствует напряжению 80 В, то при значениях температуры 80 и 90 °С происходит ее смещение до напряжения 90 В.

Наиболее значимым эффектом, возникающим при повышении температуры электролита, является смещение границы возникновения стабильного электролитно-плазменного режима в область меньших значений напряжения. Так, при температуре 70 °С стабильный электролитно-плазменный режим возникает уже при напряжении 160 В, а при увеличении температуры до 80–90 °С – при 120 В. Это связано с более благоприятными условиями для формирования парогазовой оболочки вокруг анода. Для локального вскипания электролита требуется меньше удельной энергии, что соответственно приводит к уменьшению необходимого для этого напряжения. Поэтому переход в электролитно-плазменный режим происходит раньше, а область коммутационного режима сужается и, например, при температуре электролита 90 °С находится в диапазоне значений напряжения 90–120 В.

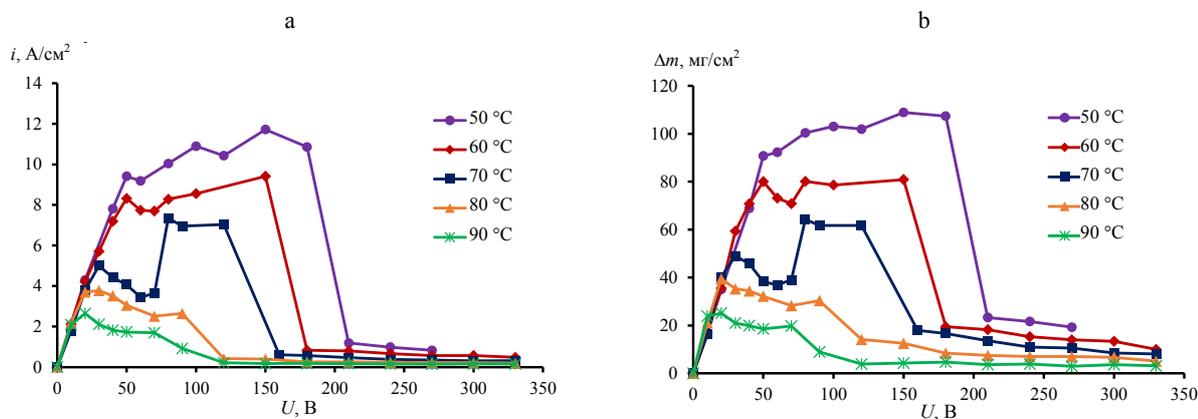


Рис. 3. Влияние напряжения на плотность тока (а) и съем металла (б)
 Fig. 3. Effect of voltage on current density (a) and metal removal (b)

В области существования стабильного электролитно-плазменного режима напряжение не оказывает существенного влияния на плотность тока и съём металла. Например, при температуре 90 °С изменение напряжения от 120 до 330 В приводит к снижению съёма металла с 4,3 до 3,1 мг/см². Более значимым параметром обработки при этом является температура электролита. При температуре 80 °С съём металла в области электролитно-плазменного режима повышается до 5,1–12,6 мг/см², а при температуре 70 °С – до 8,1–16,6 мг/см². Однако наибольший съём металла отмечается на границе электрохимического и коммутационного режимов, а также в области коммутационного режима. В зависимости от температуры электролита максимальный съём при этом превышает значения, соответствующие электролитно-плазменному режиму, в 6–8 раз.

В пределах электрохимического режима при достижении критического значения напряжения происходит снижение плотности тока и съёма металла. Такой эффект наблюдается во всем исследованном диапазоне температур, однако на представленных зависимостях наиболее отчетливо проявляется при значениях 60 и 70 °С – за снижением плотности тока и съёма металла следует рост их значений из-за возникновения коммутационного режима. Снижение плотности тока и съёма металла связано с повышением сопротивления прианодной зоны из-за образующейся на аноде в результате электролиза газовой смеси.

На основании результатов расчета по формуле (2) построена диаграмма, характеризующая влияние напряжения на коэффициент вы-

хода металла по току η при различных значениях температуры электролита (рис. 4). На диаграмме отображены данные только для тех значений напряжения, при которых во всей исследуемой области температур электролита действует один и тот же анодный режим. Такие условия выполняются в диапазоне: 10–70 В – в электрохимическом режиме; 90 В – в коммутационном; 210–330 В – в электролитно-плазменном режиме. Из диаграммы исключены данные о коэффициенте η , полученные при температуре 50 °С для значений напряжения 300 и 330 В, поскольку при этих параметрах происходил переход электролитно-плазменного процесса в режим нагрева, характеризуемый относительно малым съёмом металла.

Из диаграммы видно, что в диапазоне, соответствующем электролитно-плазменному режиму, коэффициент η существенно выше, чем при значениях напряжения, соответствующих электрохимическому и коммутационному режимам. Причем, несмотря на то что коммутационный режим характеризуется периодическим кратковременным образованием парогазовой оболочки, то есть частичным переходом в электролитно-плазменный режим, установленные для него значения коэффициента η (при напряжении 90 В) не превышают значений, полученных для электрохимического режима (10–70 В). Так, в электрохимическом режиме значения η находятся в диапазоне 0,16–0,24, в коммутационном – в диапазоне 0,18–0,24, а в электролитно-плазменном режиме при напряжении от 210 В до 330 В коэффициент η увеличивается до 0,40–0,62.

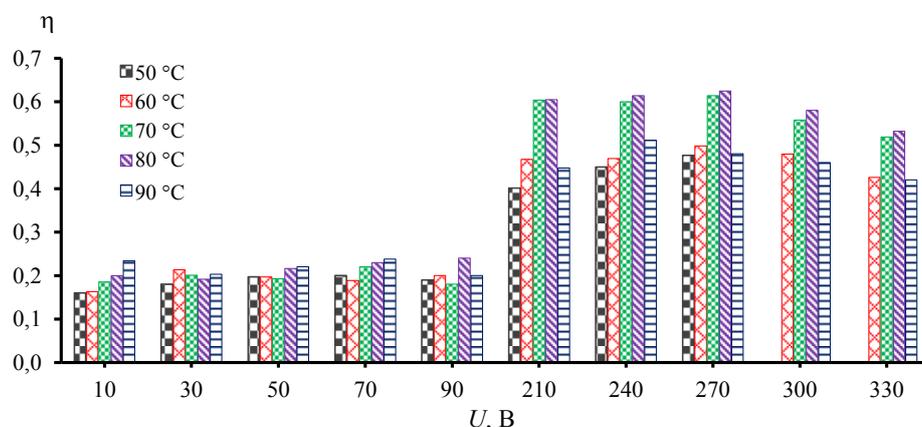


Рис. 4. Зависимость коэффициента выхода металла по току от напряжения

Fig. 4. Dependence of metal current efficiency on voltage

Низкие значения коэффициента η , полученные в области напряжений от 10 до 90 В, связаны с применением неэффективного для электрохимического процесса электролита, состав и свойства которого (прежде всего электропроводность) не позволяют обеспечить оптимальные условия для его реализации. При этом для процессов электрохимической обработки различных материалов коэффициент η может достигать 0,995. Например, при размерной электрохимической обработке стали AISI 321 с использованием в качестве электролита раствора хлорида натрия концентрацией 25 % значение коэффициента η составляет 0,61 [11].

В электролитно-плазменном режиме (210–330 В) отчетливо проявляется экстремальная зависимость коэффициента η от температуры электролита с максимумом в области 70–80 °С. При температуре 70 °С значения коэффициента η несколько меньше, чем при 80 °С. Минимальные значения коэффициента выхода по току η получены при температуре электролита 50 °С. В зависимости от напряжения они изменяются от 0,40 при 210 В до 0,47 при 270 В.

В диапазоне напряжений от 210 до 270 В при температуре 70 и 80 °С не происходит существенного изменения коэффициента η – его величина составляет 0,60–0,61 и 0,60–0,62 соответственно. Однако дальнейшее повышение напряжения приводит к снижению η . Причем такая тенденция наблюдается для всех исследованных значений температуры. Например, повышение напряжения при температуре 80 °С приводит к снижению коэффициента η до 0,58 при 300 В и до 0,53 при 330 В.

Следует отметить, что при температуре электролита 90 °С, наиболее соответствующей диапазону, при котором реализуются производственные процессы ЭПО коррозионностойких сталей, коэффициент η принимает относительно низкие значения: 0,46 – при 300 В; 0,42 – при 300 В. Таким образом, хотя эти режимы и обеспечивают минимальную плотность тока и соответственно возможность одновременной обработки большей площади, а также более высокую стабильность парогазовой оболочки, что особенно актуально при обработке изделий сложной формы, они характере-

ризуются относительно невысокой эффективностью за счет низкого коэффициента выхода по току.

На рис. 5 представлены зависимости удельной энергии, расходуемой на сьем единицы массы $q/\Delta m$, от напряжения. В электрохимическом режиме полученные зависимости имеют положительный, близкий к линейному, характер, причем температура электролита не влияет на величину параметра $q/\Delta m$. Так, при напряжении 70 В разброс значений $q/\Delta m$, полученных при различной температуре, находится в диапазоне 0,23–0,29 Вт·ч/(см²·мг). При температуре электролита 50, 60 и 70 °С линейный рост параметра $q/\Delta m$ сохраняется и в коммутационном режиме (участки зависимостей, соответствующие коммутационному режиму, отмечены прерывистой линией), а при приближении к границе электролитно-плазменного участка происходит его резкое снижение. При температуре электролита 80 и 90 °С в коммутационном режиме наблюдается только снижение параметра $q/\Delta m$. В электролитно-плазменном режиме по мере увеличения напряжения также происходит рост параметра $q/\Delta m$ по зависимости, близкой к линейной. Причем его минимальные значения обеспечиваются при температуре электролита 70 и 80 °С, что подтверждает относительно невысокую эффективность обработки при температуре 90 °С.

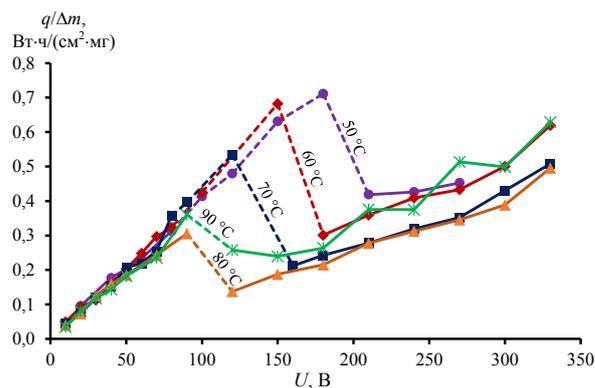


Рис. 5. Влияние напряжения на удельную энергию, расходуемую на сьем единицы массы металла

Fig. 5. Effect of voltage on the specific energy consumed to remove a unit of mass of metal

Несмотря на высокие значения коэффициента выхода по току, электролитно-плазменный режим характеризуется большими энерго-

затратами на единицу массы удаленного металла по сравнению с электрохимическим режимом. Так, при температуре 80 °С в электрохимическом режиме в диапазоне напряжения 10–70 В параметр $q/\Delta m$ принимает значения 0,04–0,31 Вт·ч/(см²·мг), а в электролитно-плазменном режиме (120–330 В) – 0,14–0,50 Вт·ч/(см²·мг). При температуре 90 °С в электролитно-плазменном режиме значение параметра $q/\Delta m$ изменяется от 0,26 до 0,63 Вт·ч/(см²·мг).

На рис. 6 представлены фотографии, характеризующие состояние поверхности образцов после обработки в различных анодных режимах при температуре электролита 80 °С. На исходной поверхности присутствуют задиры и складки, образованные при волочении проволоки, использованной для изготовления

образцов (рис. 6а). В результате обработки в электрохимическом режиме при напряжении 20 В формируется поверхность с развитым рельефом, на котором проявляются границы отдельных зерен (рис. 6б). После обработки в коммутационном режиме (90 В) формируется глянцевая поверхность, которая, однако, имеет пористую структуру с преимущественным размером пор 2–4 мкм. При этом поры имеют высокую плотность распределения – их площадь занимает 28,8 % от площади всей поверхности (рис. 6с). Обработка в электролитно-плазменном режиме при напряжении 300 В обеспечивает сглаживание поверхности и удаление задиры. На поверхности проявляются только дефекты в виде впадин складок и продольных канавок, образованных при волочении (рис. 6д).

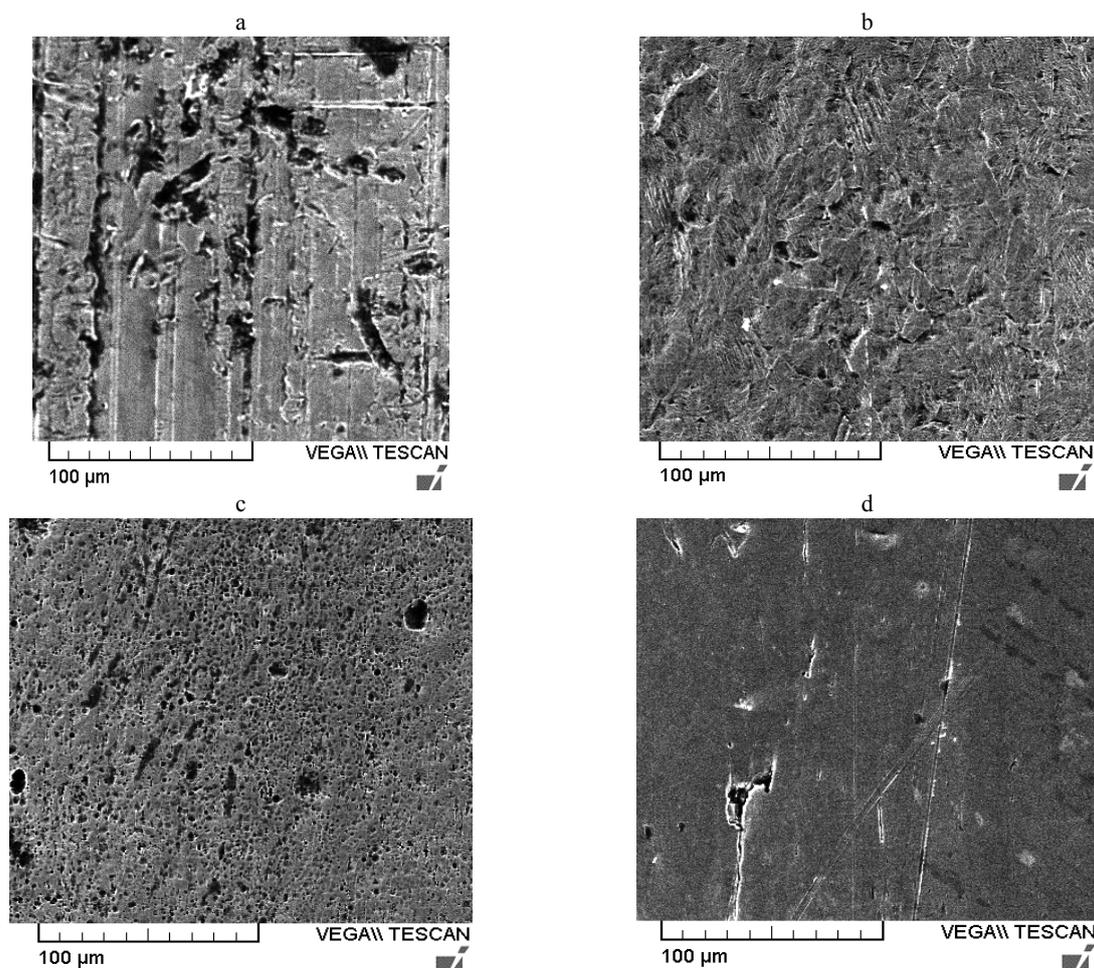


Рис. 6. Состояние поверхности после обработки в различных анодных режимах: а – исходная поверхность; б – электрохимический режим; с – коммутационный режим; д – электролитно-плазменный режим

Fig. 6. Surface condition after treatment in various anodic modes: а – initial surface; б – electrochemical mode; с – switching mode; д – electrolyte-plasma mode

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что в процессе анодной обработки в 5%-м растворе сульфата аммония, широко применяемом в практике ЭПО коррозионностойких сталей, наибольший съём металла отмечается на границе электрохимического и коммутационного режимов, а также в области коммутационного режима. В зависимости от температуры электролита максимальный съём при этом превышает значения, соответствующие электролитно-плазменному режиму, в 6–8 раз. В области значений напряжения, соответствующей электролитно-плазменному режиму, коэффициент выхода металла по току η существенно выше, чем при значениях напряжения, соответствующих электрохимическому и коммутационному режимам. В зависимости от температуры электролита значения η находятся в следующих диапазонах: в электролитно-плазменном режиме – 0,40–0,62; в коммутационном – 0,18–0,24; в электрохимическом – 0,16–0,24.

2. В электролитно-плазменном режиме (210–330 В) максимум коэффициента η обеспечивается в области температуры электролита 70–80 °С. При этом в диапазоне напряжений от 210 до 270 В не происходит существенного изменения η – его величина составляет 0,60–0,62 соответственно. Однако дальнейшее повышение напряжения приводит к снижению коэффициента η . Так, повышение напряжения при температуре 80 °С приводит к снижению коэффициента η до 0,58 при 300 В и до 0,53 при 330 В.

3. Электролитно-плазменный режим характеризуется большими энергозатратами на единицу массы удаленного металла ($q/\Delta t$) по сравнению с электрохимическим режимом. Так, при температуре 80 °С в электрохимическом режиме в диапазоне напряжения 10–70 В параметр $q/\Delta t$ принимает значения 0,04–0,31 Вт·ч/(см²·мг), а в электролитно-плазменном режиме (120–330 В) – 0,14–0,50 Вт·ч/(см²·мг). При температуре 90 °С в электролитно-плазменном режиме значение параметра $q/\Delta t$ изменяется от 0,26 до 0,63 Вт·ч/(см²·мг). Поэтому совмещение

этих режимов в одном анодном процессе позволяет использовать преимущества каждого из них: интенсивный съём металла при низких энергозатратах в электрохимическом режиме и полирование с достижением высокого качества поверхности в электролитно-плазменном режиме. За счет такого комплексного электролитно-плазменного и электрохимического воздействия становится возможным создание эффективных процессов повышения качества поверхности и размерной обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Surface Finish Machining of Medical Parts Using Plasma Electrolytic Polishing / H. Zeidler, F. Boettger-Hiller, J. Edelmann, A. Schubert // *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 49. P. 83–87. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.07.038>.
2. Aliakseyeu, Yu. Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces / Yu. Aliakseyeu, A. Korolyov, A. Bezyazychnaya // 14 International Scientific Conference “CO-MAT-TECH-2006”, Slovakia, Trnava, 19–20 October 2006. P. 6.
3. Electrolytic Plasma Polishing of NiTi Alloy / A. Korolyov, A. Bubulis, J. Věžys [et al.] // *Mathematical Models In Engineering*. 2021. Vol. 7, iss. 4. P. 70–80. <https://doi.org/10.21595/mme.2021.22351>.
4. Модель размерного съема материала при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей / Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королёв, А. Э. Паршутто, В. С. Нисс // *Наука и техника*. 2012. № 3. С. 3–6.
5. Plasma Electrolyte Polishing of Titanium and Niobium Alloys in Low Concentrated Salt Solution Based Electrolyte / Y. Aliakseyeu, A. Bubulis, A. Korolyov [et al.] // *Mechanika*. 2021. Vol. 27, No 1, P. 88–93. <https://doi.org/10.5755/j02.mech.25044>.
6. Электролитно-плазменная обработка внутренних поверхностей трубчатых изделий / Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королёв, В. С. Нисс, А. Э. Паршутто // *Наука и техника*. 2016. № 1. С. 61–68.
7. Куликов, И. С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И. С. Куликов, С. В. Вашенко, А. Я. Каменев. Минск: Беларус. навука, 2010. 232 с.
8. Электролитно-плазменная обработка при нестационарных режимах в условиях высокоградиентного электрического поля / Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королёв, А. Э. Паршутто, В. С. Нисс // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 5. С. 391–399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399>.
9. Электролитно-плазменная обработка в управляемых импульсных режимах / А. Ю. Королёв, Ю. Г. Алексеев, В. С. Нисс, А. Э. Паршутто // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 4. С. 279–286. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-279-286>.

10. Королев, А. Ю. Энергетические характеристики стадии формирования парогазовой оболочки при электролитно-плазменной обработке / А. Ю. Королев, В. А. Томило, В. С. Нисс // Докл. Над. акад. наук Беларуси. 2024. Т. 68, № 4. С. 344–352. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-4-344-352>.
11. Амитан, Г. Л. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г. Л. Амитан, И. А. Байсупов, Ю. М. Барон [и др.]; под. общ. ред. В. А. Волосатова. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1988. 719 с.

Поступила 30.10.2024

Подписана в печать 14.01.2025

Опубликована онлайн 31.03.2025

REFERENCES

1. Zeidler H., Boettger-Hiller F., Edelmann J., Schubert A. (2016) Surface Finish Machining of Medical Parts Using Plasma Electrolytic Polishing. *Procedia CIRP*, 49, 83–87. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.07.038>.
2. Aliakseyeu Yu., Korolyov A., Bezyazychnaya A. (2006) Electrolyte-Plasma Treatment of Metal Materials Surfaces. *14 International Scientific Conference "CO-MAT-TECH-2006", Slovakia, Trnava, 19–20 October 2006*, 6.
3. Korolyov A., Bubulis A., Vėžys J., Aliakseyeu Y., Minchenya V., Niss V., Markin D. (2021). Electrolytic Plasma Polishing of NiTi Alloy. *Mathematical Models in Engineering*, 7 (4), 70–80. <https://doi.org/10.21595/mme.2021.22351>.
4. 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 Tehnika = Science & Technique*, (3), 3–6 (in Russian).
5. Aliakseyeu Y., Bubulis A., 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. <https://doi.org/10.5755/j02.mech.25044>.
6. Alekseev Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuta A. E. (2016) Electrolytic-Plasma Treatment of Inner Surface of Tubular Products. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 15 (1), 61–68 (in Russian).
7. Kulikov I. S., Vashchenko S. V., Kamenev A. Ya. (2010) *Electrolyte-Plasma Processing of Materials*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 232 (in Russian).
8. 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 Tehnika = Science & Technique*, 16 (5), 391–399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399> (in Russian).
9. Korolyov A. Yu., Aliakseyeu Yu. G., Niss V. S., Parshuta A. E. (2021) Electrolyte-Plasma Treatment in Controlled Pulse Modes. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 20 (4), 279–286. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-279-286> (in Russian).
10. Korolyov A. Yu., Tomilo V. A., Niss V. S. (2024) 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*, 68 (4), pp. 344–352. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2024-68-4-344-352> (in Russian).
11. Amitan G. L., Baisupov I. A., Baron Yu. M. (1988) *Handbook of Electrochemical and Electrophysical Processing Methods*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., Leningrad Branch. 719 (in Russian).

Received: 30.10.2024

Accepted: 14.01.2025

Published online: 31.03.2025