

DOI: 10.34220/2311-8873-2023-35-48



УДК 621.03

UDC 621.03

2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

2.5.6 – Технология машиностроения

АНАЛИЗ МОРФОЛОГИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ СТРУИ НА ПОВЕРХНОСТЬ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

ANALYSIS OF MORPHOLOGY UNDER THE INFLUENCE OF AN ELECTROLYTIC JET ON THE SURFACE OF STAINLESS STEEL

✉¹ Попов Александр Иннокентьевич, к.т.н., доцент, Высшая школа машиностроения, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, e-mail: popov_ai@spbstu.ru

✉¹ Popov Alexander Innokentievich, ph.d., associate professor, higher school of mechanical engineering, Peter the great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, e-mail: popov_ai@spbstu.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию воздействия электролитической струи на поверхность металлического анода. Исследования проводили в режиме электролиза с исследованием перехода к режиму электролитно-плазменной обработки. Особое внимание в работе уделено механизмам формирования морфологии поверхности нержавеющей стали 08X18H9T, AISI 301, AISI 304. Показано, что для разных сталей процесс электрохимического растворения материала анода сопровождается разными механизмами растворения микронеровностей микропрофиля. Исследованы вольт-амперные характеристики процесса в диапазоне напряжений в интервале 20–250 В. Рассмотрено влияние убыли массы материала анода от величины тока. Исследована морфология сталей при разных технологических режимах и в разных точках контакта электролитической струи с поверхностью. Рассмотрены критерии, сопровождающие переход к электролитно-плазменному режиму от режима электролиза. Исследовано влияние электролитической струи на сформированные механической обработкой риски на поверхности анода. Рассмотрено влияние напряжения на формируемый параметр шероховатости поверхности Ra. Выполнен расчет

Annotation. This article is devoted to the study of the effect of an electrolytic jet on the surface of a metal anode. The studies were carried out in the electrolysis mode with a transition to the electrolyte-plasma treatment mode. Particular attention in the work is paid to the mechanisms of formation of the surface morphology of stainless steels 08X18H9T, AISI 301, AISI 304. It has been shown that for different steels the process of electrochemical dissolution of the anode material is accompanied by different mechanisms of dissolution of microirregularities in the microprofile. The current-voltage characteristics of the process were studied in the voltage range from 20–250 V. The influence of the rate of loss of the mass of the anode material on the current value was considered. The surface morphology was studied under different technological conditions and at different points of the electrolytic jet. The criteria that accompany the transition to the electrolyte-plasma mode from the electrolysis mode are considered. The influence of an electrolytic jet on the marks formed by mechanical processing on the anode surface was studied. The influence of stress on the formed surface roughness parameter Ra is considered. The electric field strength for surface nanodefects was calculated

напряженности электрического поля для нанодефектов поверхности в программе Comsol Multithysics. Результаты данной работы могут быть использованы для развития технологии обработки турбинных лопаток, электрохимической резки и нанообработки материалов.

using the Comsol Multithysics program. The results of this work can be used for the development of technology for processing turbine blades, electrochemical cutting and nanoprocessing of materials.

Ключевые слова: НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ, ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКАЯ СТРУЯ, МОРФОЛОГИЯ, ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ, УБЫЛЬ МАССЫ, ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Keywords: STAINLESS STEEL, ELECTROLYTIC JET, MORPHOLOGY, SURFACE ROUGHNESS, WEIGHT LOSS, ELECTROSTATIC MODELING.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Развитие новых технологических методов размерной и финишной обработки во многом осуществляется на базе уже состоявшихся технологий и стимулируется активным поиском инновационных решений для обеспечения технологического рывка России [1-3]. Среди таких базовых технологий размерной обработки электрохимическая обработка изделий в электролитической ванне занимает значительное место. Она характеризуется низкими напряжениями в интервале $U = 3 \dots 60$ В, большими величинами применяемых токов ($I = 10000$ А) и, следовательно, высокими скоростями удаления материала анода [4-8]. Размерная электрохимическая обработка является конкурирующим методом лезвийной обработки материалов, к которой относятся точение, фрезерование, строгание, долбление, шлифование и др. Кроме этого, она может являться конкурирующей обработкой для раскрытия материала такими методами как плазменная, газопламенная, лазерная резка, комбинированная струйно-абразивная обработка [9-11]. Однако методы струйной обработки на сегодня недостаточно изучены. Известно о применении электролитической струи при выполнении операций прошивания отверстий и поверхностной обработке [12-15]. Однако мало сведений об использовании струи электролита в диапазоне напряжений $U = 60 \dots 200$ В для размерной обработки и резки материалов [16-18]. На наш взгляд, заполнение вакуума информации в этой области может привести к формированию нового метода размерной и раскройной технологий обработки материалов. Целью исследования является изучение механизмов воздействия электролитической струи на поверхность материала анода. Задачами работы являются построение вольтамперной характеристики (ВАХ) при разных объемных расходах электролита, оценка морфологии поверхности, оценка убыли массы образцов в процессе струйной обработки, выявление границ перехода от процессов электролиза к электролитно-плазменной обработке

2 Материалы и методы

В качестве установки для исследований мы применяли прототип установки струйной обработки [19]. Принципиальная схема установки приведена на рис.1. В качестве анода использовали образцы $40 \times 50 \times 1$ мм из нержавеющей сталей 08X18H9T, AISI 301 и AISI 304 с исходным параметром шероховатости $Ra = 0,8 \dots 12$ мкм. Межэлектродный зазор h между полым катодом (медной трубкой с внутренним диаметром $\varnothing 3$ мм и наружным $\varnothing 5$ мм) и анодом (пластиной из нержавеющей стали) составил $1 \dots 4,5$ мм. Исследования проводили при перемещении полого катода с подачей, равной $S = 180 \dots 500$ мм/мин. Исходная температура

подаваемого в полый катод электролита была $T = 20^\circ \text{C}$. Определение вольт-амперной характеристики проводили при разных объемных расходах электролита. Для свободнопадающей струи электролита объемный расход составил $Q = 33$ л/ч, а при подаче электролита под давлением с использованием лопастного насоса объемный расход составил $Q = 88$ л/ч. Время исследований для опытов составляло 60, 120, 180 с. В качестве электролита использовался раствор K_2SO_4 с концентрацией $K = 5$ г/л и раствор нитрата аммония NH_4NO_3 с концентрацией до $K = 20 \dots 40$ г/л. Измерение объемного расхода электролита проводили с помощью мерного стакана (ГОСТ 1770–74). Время прохождения электролита фиксировалось секундомером. Рабочее напряжение варьировали в интервале $U = 20 \dots 300$ В. Напряжение контролировали щитовым вольтметром Omix DV–1–0.5. Величину тока измеряли токовыми клещами UT210D.

Расчет напряженности электрического поля производили при использовании программы Comsol Multithysics.

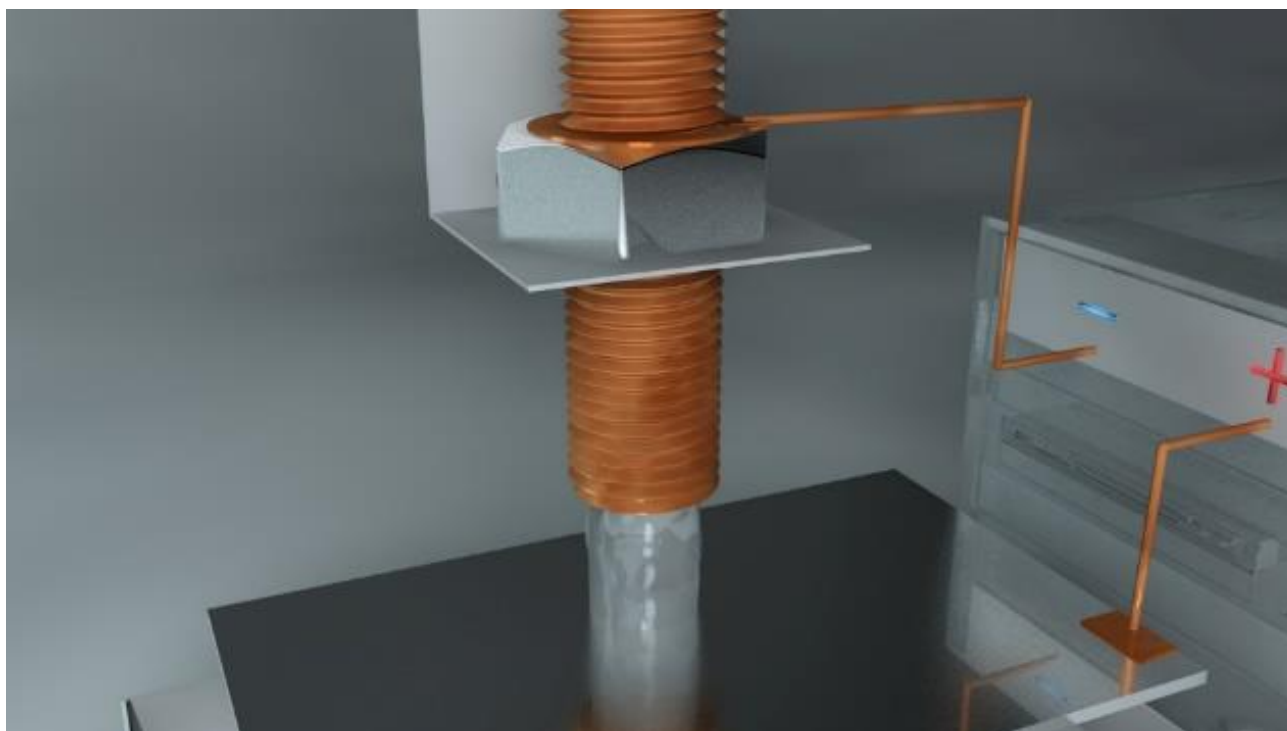
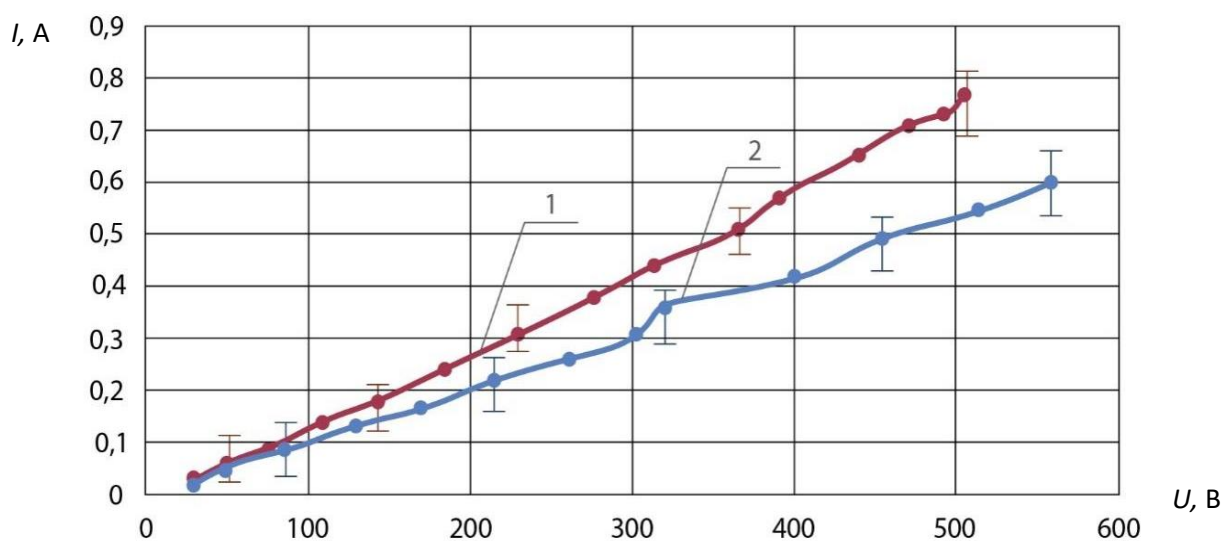


Рисунок 1 – Принципиальная схема прототипа струйной электролитно-плазменной установки

3 Результаты исследований

Вольтамперная характеристика (ВАХ) является важнейшим информативным показателем процесса электрохимической и электрофизической обработки (рис. 2). Исследование проводили при разных объемных расходах электролита и при фиксированной температуре электролита на входе в полый катод, равной $T = 20^\circ \text{C}$. Результаты измерений показывают, что при разных расходах электролита при данной температуре ВАХ имеет фактически линейный характер. Это может говорить о том, что на этом отрезке сопротивление межэлектродного промежутка является величиной постоянной. К тому же можно предположить, что, если зависимость имеет линейный характер, то она соответствует режиму электролиза и подчиняется второму закону Фарадея.



1 – $Q = 33$ л/ч; 2 – $Q = 88$ л/ч

Рисунок 2 – Вольтамперная характеристика процесса струйной обработки при разных расходах электролита K_2SO_4 ($K = 5$ г/л)

Принято считать, что убыль массы образцов при обработке в режиме электролиза описывается вторым законом Фарадея [20]:

$$m = k \cdot \eta a \cdot I \cdot t, \quad (1)$$

где, k – электрохимический эквивалент вещества, численно равный массе вещества, выделившегося при прохождении через электролит единичного электрического заряда; ηa – коэффициент выхода по току; I – величина силы тока, А; t – время электролиза, с.

Однако исследования Фарадея наиболее справедливы для режима массопереноса в электролитической ванне (до $U = 60$ В) [21]. Для понимания того, насколько эффективно работает данный закон для более высоких напряжений, и выявления его соответствия при струйной обработке для более высоких напряжений, мы провели исследование потери массы образца в диапазоне напряжений до $U = 200$ В. График убыли массы образцов представлен на рис. 3. Анализ показывает, что увеличение напряжения в цепи при постоянной концентрации и объемном расходе электролита ведет к увеличению убыли массы. Так, средний коэффициент съема металла ($K_c = d\Delta / dU$) при расходе электролита $Q = 88$ л/ч и межэлектродном зазоре $h = 4,5$ мм (кривая 1) на участке напряжений 60 ... 100 В составляет $1 \cdot 10^{-4}$ мг/В, а на участке 100 ... 200 В – $1,3 \cdot 10^{-4}$ мг/В, при этом на участке 80 ... 120 В он практически не меняется на уровне $\sim 0,25 \cdot 10^{-4}$ мг/В. Это может говорить о том, что для данного диапазона изменяется коэффициент выхода по току ηa . Возможно, это связано с тем, что при данных объемных расходах электролита ($Q = 33 \dots 88$ л/ч), межэлектродных промежутках (1 ... 4.5 мм) и выделяемой мощности температура струи в период воздействия ее на металлический анод является относительно постоянной, около 25 ... 27 °С, за счет высокой скорости потока электролита. При дальнейшем увеличении напряжения ($U = 60 \dots 200$ В) температура электролита в указанном диапазоне растет до 35 ... 43°С при активном выделении Джоулева тепла:

$$dQ = I^2 \cdot R \cdot dt, \quad (2)$$

где dQ – количество теплоты, выделяемое за промежуток времени dt , Дж/с;

I – величина силы тока, А;

R – сопротивление, Ом.

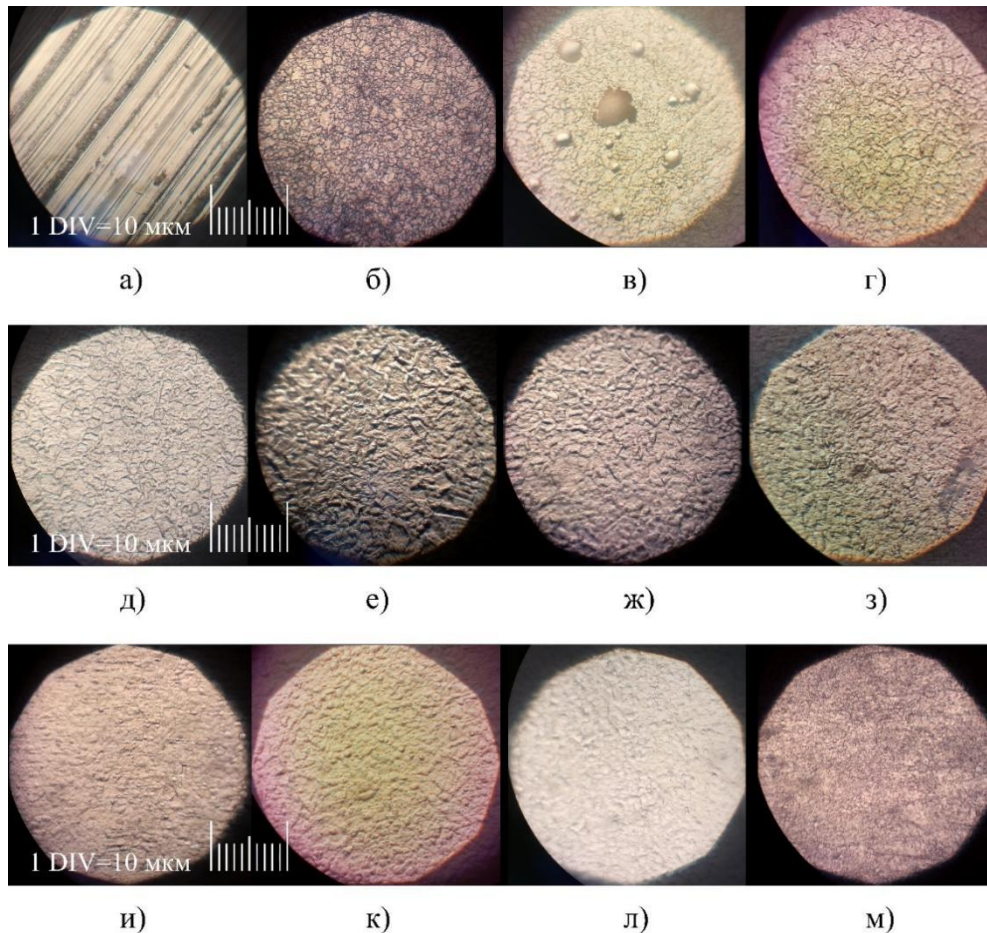
Очевидно, что это ускоряет и активизирует процессы в электролите и на поверхности анода, и ведет к увеличению съема металла анода, но не приводит к вскипанию электролита и переходу к процессу электролитно-плазменной обработки с формированием электролитно-плазменного слоя на поверхности анода. Стремление увеличить съем материала за счет поднятия напряжения в цепи сопровождается проблемой, связанной с возникновением в межэлектродном промежутке искровых разрядов, переходящих в дуговые. Так, для объемных расходов электролита $Q = 33$ л/ч и межэлектродного промежутка 1 мм этот предел фиксируется при $U = 140 \dots 200$ В, а при межэлектродном промежутке $h = 4,5$ мм он составляет $U = 160 \dots 200$ В.



1 – $h = 4,5$ мм, $Q = 88$ л/ч; 2 – $h = 1$ мм, $Q = 33$ л/ч

Рисунок 3 – Зависимость величины убыли массы образца при изменении напряжения между токоподводами (сталь 08Х18Н9Т).

Анализ морфологии поверхности в процессе струйной электролитно-плазменной обработки показывает, что при разных технологических режимах для одних и тех же материалов формируются общие закономерности, связанные с растворением материала анода струей электролита (рис. 4). Эти закономерности присущи как при падении свободной струи, так и для струи, подаваемой под давлением. Рассмотрим исходную поверхность (рис. 4, а). При рассмотрении поверхности при большом увеличении фиксируется развитый рельеф, сформированный абразивными зёрнами шлифовального круга. При этом хорошо различимыми являются отдельные зёрна металла образца, включенные в состав гребней микрорельефа. При подаче электролита и напряжения в цепи рельеф начинает изменяться. Для разных металлов наблюдается два основных механизма изменения морфологии поверхности и две особенности формирования рельефа при струйной обработке.



а) исходное состояние поверхности (сталь AISI 301); б) область воздействия периферии струи, выявление зерен микроструктуры (сталь AISI 301); в) зона возникновения искрового разряда, сталь AISI 301; г) увеличенный съем зерен; д) ускоренное растворение зерен; е) возникновение угловатой структуры (сталь 08X18H9T); ж) развитие валиков межзеренного пространства; з) начало дробления валиков межзеренного пространства; и) область сглаживания регулярного микрорельефа поверхности (сталь 08X18H9T); к) центральная зона струи (сталь 08X18H9T); л) развитие инверсии съема (вогнутая поверхность локальных зон обработки; м) морфология поверхности стали AISI 301

Рисунок 4 – Изменение морфологии поверхности нержавеющей сталей под влиянием электролитической струи

Первый механизм – преимущественное растворение поверхности зерен металла. Второй механизм - преимущественное растворение межзеренного пространства.

Каждый из них можно разделить на пять основных стадий. Стадии механизма преимущественного растворения поверхности зерен металла:

- четкое выявление границ зерен на поверхности (рис. 4, б);
- ускоренное растворение площади зерен и уменьшенное растворение межзеренного пространства (рис. 4, б, в, г, д);
- формирование явно выраженного рисунка из площадок зерен и валиков, разделяющих эти зерна (рис. 4, б, в, г, д);
- укрупнение валиков зерен и уменьшение межзеренного пространства (рис. 4, е, ж, з);
- дробление валиков на мелкие отдельные составляющие и относительное выравнивание рельефа поверхности (рис. 4, з, и, к).

Стадии механизма преимущественного растворения межзеренного пространства:

- четкое выявление границ зерен на поверхности и обозначение зерен на поверхности микронеровностей;
- ускоренное растворение межзеренного пространства и прорезание в разных направлениях канавками гребней микронеровностей в виде микронеровностей шероховатости;
- формирование явно выраженного рисунка из площадок зерен и валиков, разделяющих эти зерна;
- рост канавок границ зерен в разных направлениях, почти полное удаление гребней микропрофиля и уменьшение площадей зерен;
- дробление остатков зерен на мелкие отдельные составляющие и выравниванию рельефа поверхности с получением чешуйчатой структуры (рис. 4, и, л).

Исследования морфологии поверхности от напряжения ($U = 20 \dots 200$ В) показывают, что для стали AISI 304 (табл.) имеется ряд особенностей.

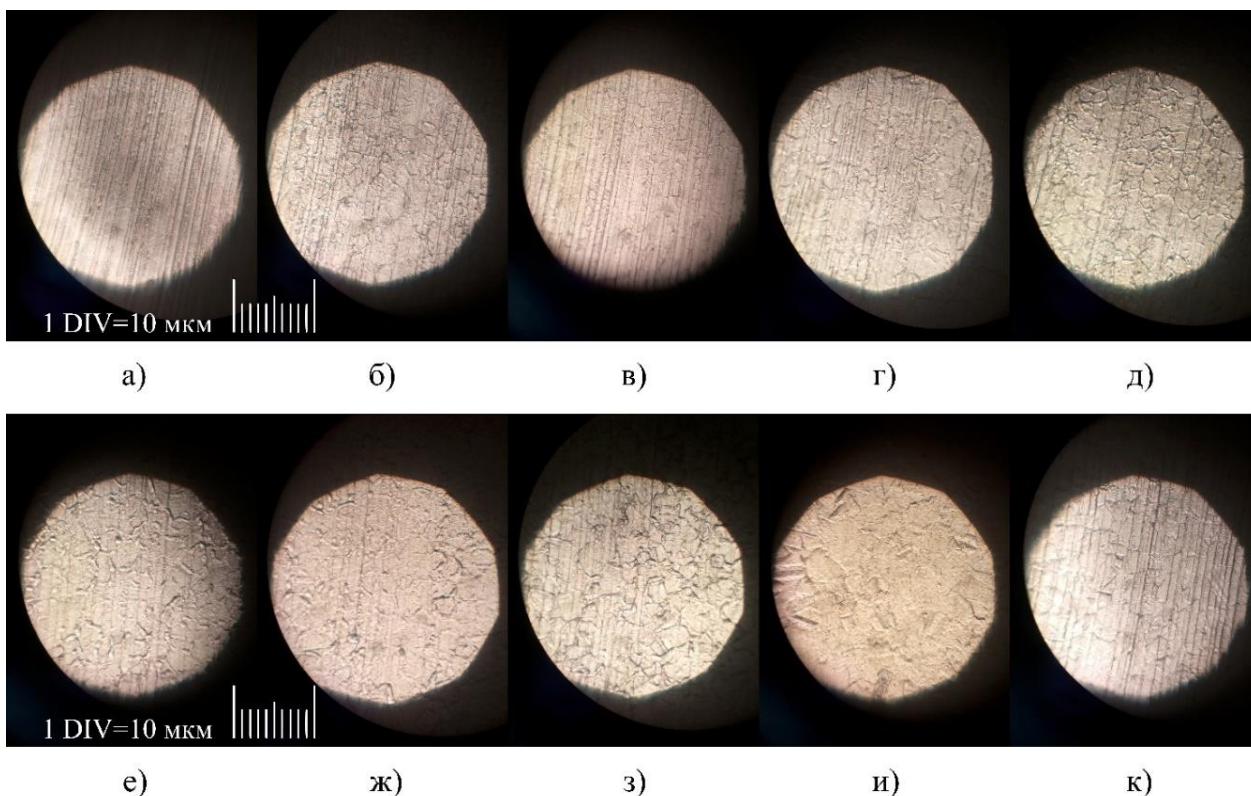
Таблица – Анализ морфологии поверхности нержавеющей стали AISI 304 в процессе обработки электролитической струей ($Q = 33$ л/ч)

Элементы морфологии	Напряжение, В									
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Скругление вершин микрорельефа	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Эрозия поверхности граней микрорельефа	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Выравнивание поверхности	-	-	+	+	-	+	+	+	+	+
Уменьшение межзеренного пространства	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Увеличение межзеренного пространства	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-
Сглаживание рисков	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-
Эрозия всей поверхности	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Травление всей поверхности	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
Наличие следов от искровых разрядов	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+
Наличие блеска	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+
Температура электролита на входе в полый катод, °С	20	20	20	20	20	20	22	25	35	36
Ярко выраженные признаки элементов морфологии: «-» – отсутствие признака; «+» – наличие признака										

Морфология поверхности после струйной обработки представлена на рис. 5. Анализ показывает разнообразный микрорельеф с характерными особенностями. Среди них эрозия поверхности граней и скругление вершин микрорельефа наиболее характерны для низких напряжений, выравнивание поверхности происходит в разной степени для всех видов напряжений, увеличение межзеренного пространства фиксируется в основном для малых напряжений, сглаживание рисков происходит при более высоких напряжениях, травление всей поверхности происходит при самом высоком напряжении и минимальном съеме в каждой точке поверхности образца. Важным является тот факт, что на поверхности с напряжением $U = 120 \dots 200$ В фиксируются следы от искровых микроударов. Это может говорить о том, что начиная с напряжения $U = 120$ В массоперенос с анода в виде отдельных ионов металла дополняется массопереносом за счет искровых разрядов, разрушающих поверхность расплавлением в

локальных областях и вырывания из нее расплавленной части металла. Наиболее характерным является напряжение цепи в $U = 200$ В. В этом случае наблюдается комбинированное воздействие на поверхность двух механизмов съема материала – электрохимическое растворение и электролитно-плазменная обработка с преобладанием последней. При электрохимическом растворении наблюдается рост выделяемой мощности и увеличение съема, при электролитно-плазменном наблюдается обработка поверхности разрядами с малой энергией. Это обеспечивает мельчайшую проработку и выявление всех элементов поверхности. При увеличении напряжения в цепи до $U = 200$ В температура электролита достигает $T = 35 \dots 43^\circ \text{C}$, а напряженность поля – $E = 7,48 \times 10^5$ В/м. Очевидно, что в этом случае температуры и напряженности поля достаточно для частичной ионизации межэлектродного промежутка и возникновения процесса струйной электролитно-плазменной обработки.

Среди особенностей формирования морфологии поверхности можно отметить наличие инверсии при обработке струей электролита. В одном случае поверхность формируется в виде выпуклых полусфер, в другом случае наоборот поверхность формируется в виде вогнутых сферических поверхностей. Условия получения данной морфологии требуют дальнейших исследований.



а) $U = 20$ В; б) $U = 40$ В; в) $U = 60$ В; г) $U = 80$ В; д) $U = 100$ В; е) $U = 120$ В;
ж) $U = 140$ В; з) $U = 160$ В; и) $U = 180$ В; к) $U = 200$ В

Рисунок 5 – Изменение морфологии поверхности нержавеющей стали AISI 304 под влиянием электролитической струи при разных напряжениях

Нами было исследовано изменение параметра шероховатости поверхности R_a при изменении напряжения в цепи. Зависимость (рис. 6) показывает рост параметра шероховатости поверхности R_a в интервале $U = 20 \dots 40$ В и плавное уменьшение до $U = 100$ В. Это происходит при увеличении общей мощности разряда и увеличении скорости съема материала анода.

Анализ напряженности электрического поля, проводили в соответствии с уравнением:

$$\operatorname{div}(\varepsilon \operatorname{grad}U) = -\rho, \quad (1)$$

где U – потенциал электростатического поля; ε – диэлектрическая проницаемость; ρ – плотность объемных свободных зарядов.

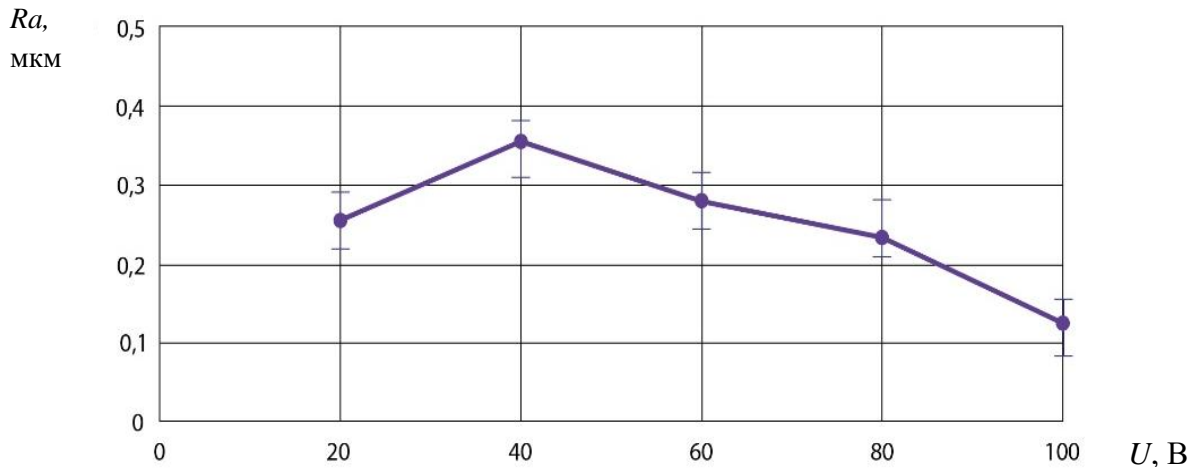


Рисунок 6 – Зависимость изменения параметра шероховатости Ra от напряжения при струйной электролитно-плазменной обработке

Учитывая, что плотность объемного заряда равна:

$$\rho = 0. \quad (2)$$

Оценку потенциала записываем с использованием векторного дифференциального оператора набла ∇ :

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla U) = -\rho, E = -\nabla U, \quad (3)$$

где ∇ – векторный дифференциальный оператор набла; E – вектор напряженности электрического поля.

При использовании осесимметричной модели выражение (3) можно записать в виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -\rho, E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}, E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}. \quad (4)$$

Расчет напряженности электрического поля показывает, что данная величина при напряжении $U = 60$ В, высоте межэлектродного промежутка $h = 3$ мм составляет $E = 3,57 \times 10^5$ В/м, а для $U = 200$ В – соответственно $E = 7,43 \times 10^5$ В/м. Расчет, проведенный в программе Comsol Multithysics показывает, что между наружным и внутренним срезом медной трубки полого катода и поверхностью анода из нержавеющей стали формируется электрическое поле с потенциалом $U = 60$ В (рис. 7, а).

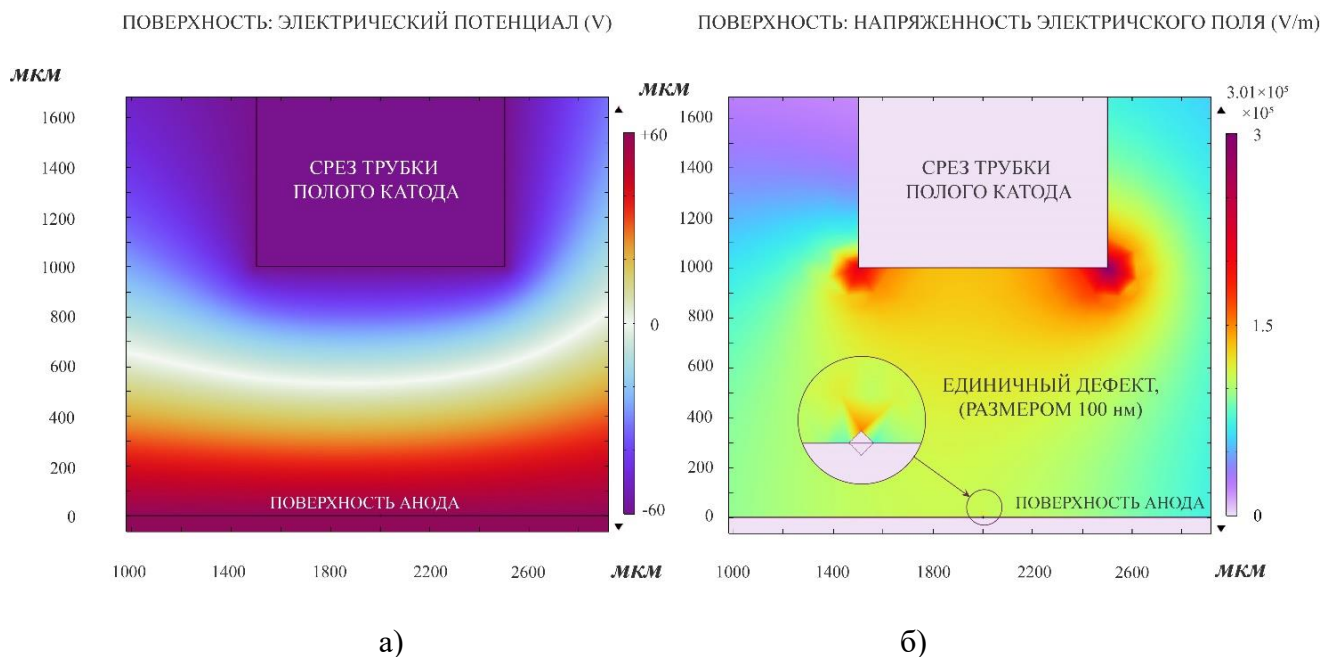


Рисунок 7 – Результаты расчета в программе Comsol Multiphysics распределения электрического потенциала (а) и распределения напряженности электрического поля для поверхности с нанodefектом (б)

При этом возникает большая напряженность электрического поля не только на вершинах микронеровностей, острых краях трубки полого катода, но и на микродефектах поверхности, полученных процессами шлифования (рис. 7, б). Нанodefекты порядка 100 нм и более, сформированные абразивными зернами, локализуют на себя электрическое поле и формируют высокую напряженность $E = 3,57 \times 10^5$ В/м, сопоставимую с вершинами микронеровностей. Поэтому за счет высокой неоднородности электрического поля на вершинах микро- и макродефектов поверхности максимальный съем происходит именно в этих местах, сглаживая развитую поверхность металлического анода как на пиках, так и во впадинах материала.

4 Обсуждение и заключение

Изменение энергии частиц и напряженности поля от оси электролитической струи приводит к изменению морфологии в разных точках ее взаимодействия с поверхностью анода.

В процессе электрохимической обработки в исследуемом диапазоне эффективно удаляются множественные микронеровности поверхности, характеризующие параметр шероховатости Ra 0,8 ... 1,6 мкм.

Электростатические расчеты показывают, что при электрохимической обработке струей электролита между срезом полого катода и поверхностью металлического анода возникает высокая напряженность электрического поля до $E = 3,57-7,43 \times 10^5$ В/м.

На дефектах поверхности порядка 100 нм, расположенных во впадинах, возникает напряженность электрического поля, сопоставимая с напряженностью на пиках микронеровностей, что ведет к конкурентному растворению этих областей.

Для изменения морфологии поверхности характерна повторяемость ее рисунка для разных напряжений.

Процесс электрохимического растворения (электролиза) при повышении напряжения и уменьшении межэлектродных зазоров ограничивается повышением температуры

струи до $T = 35 \dots 43$ °С, вследствие чего происходит переход к локальной ионизации межэлектродного промежутка и возникновение искровых разрядов, переходящих в дуговые.

При струйной обработке с объемными расходами электролита $Q = 33 \dots 88$ л/ч граница процесса электролиза смещается с $U = 30 \dots 80$ В, характерной для обработки в электролитической ванне, до $U = 140 \dots 200$ В для обработки электролитической струей.

Для напряжения $U = 60 \dots 200$ В классический процесс электролиза отличается увеличенным коэффициентом выхода по току и наличием в струе искровых разрядов малых энергий.

Благодарность. Автор выражает благодарность графическому дизайнеру Диане Поповой за подготовку иллюстраций.

Список литературы

1 Степанова, Т. Д. Технологический суверенитет России как элемент экономической безопасности // Экономический журнал Экономика: вчера, сегодня, завтра. – Том 12. – № 9А, 2022. – С. 567–575.

2 Принципы построения автоматизированных систем поддержки жизненного цикла инновационных продуктов / А. И. Надеев, А. И. Попова, А. В. Сурина, Ю. К. Свечников // Датчики и системы. – 2006. – № 11. – С. 59-63. – EDN KWMQTP.

3 Попова, А. И. Инфраструктурный комплекс поддержки предпринимательства / А. И. Попова // Право, экономика и управление: теория и практика: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Чебоксары, 02 декабря 2021 года / Гл. редактор Э.В. Фомин. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский дом «Среда», 2021. – С. 148-150. – EDN XXJRQM.

4 Епрынцева, Д. В. Электрохимическая анодная обработка деталей для ракетной техники / Д. В. Епрынцева, И. М. Винокурова, В. И. Федянин // Актуальные проблемы инновационных систем информатизации и безопасности: Материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 28–31 марта 2010 года. Том Часть 2. – Воронеж, 2010. – С. 311-315. – EDN UXLQOJ.

5 Shvaleva, N. A. Analysis of the design of a slotted cathode tool for the electrochemical machining of thin-walled parts / N. A. Shvaleva, A. A. Fadeev // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2022. – No. 29. – P. 14-18. – DOI 10.26160/2474-5901-2022-29-14-18. – EDN FKLXMY.

6 Бухта, С. Н. Решение технических задач при внедрении окончательной обработки лопаток ГТД методом электрохимической обработки (эхо) / С. Н. Бухта, Л. А. Пет // Наука - производству: Ежегодный научно-технический сборник / Под общей редакцией В.Л. Юрьева. Том Выпуск 10. – УФА: ГОУ ВПО "Уфимский государственный авиационный технический университет", 2017. – С. 54-68. – EDN ZWKAHT.

7 Шеханов, Р. Ф. Электрохимическое маркирование нержавеющей стали / Р. Ф. Шеханов, М. Г. Донцов, И. В. Братков // Современные проблемы теоретической и прикладной электрохимии. Электрохимия в настоящем и будущем: XIV Плесская международная научная конференция, тезисы докладов, Плещ, 03–07 июля 2023 года. – Иваново: Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, 2023. – С. 72. – EDN XGPXSF.

8 Сокольников, В. Н. Технологические особенности анодного растворения в комбинированной упрочняющей обработке при доводке высокооборотных роторов / В. Н. Сокольников, Г. А. Сухочев, С. Н. Коденцев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т. 17, № 12(204). – С. 555-557. – DOI 10.36652/1813-1336-2021-17-12-555-557. – EDN XOKLFFJ.

9 High-energy laser treatment of plasma coatings from materials based on oxide ceramics / F. I. Panteleenko, V. A. Okovity, O. G. Devoino [et al.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2022. – No. 3(78). – P. 83-88. – EDN TERAJD.

10 Sergeev, N. & Minaev, I. & Tikhonova, I. & Gvozdev, A. & Kolmakov, A. & Sergeev, A. & Kutepov, S. & Malii, D. (2020). Selecting Laser Cutting Modes for Engineering Steel Sheets

Aiming at Provision of the Required Properties of Surface Quality. *Inorganic Materials: Applied Research*. 11. 815-822. 10.1134/S2075113320040358.

11 Гарагуля, Д. В. Преимущества гидроабразивной резки при раскрое листового металла / Д. В. Гарагуля // *Морской вестник*. – 2017. – № 4(64). – С. 37-38. – EDN ZUQMKL.

12 Фомин, В. В. Профилирование высокоточных отверстий / В. В. Фомин // *Студенческая наука - первый шаг к цифровизации сельского хозяйства : Материалы Всероссийской студенческой научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО Чувашский ГАУ, в 3 ч., Чебоксары, 15 октября 2021 года. Том Ч. 2. – Чебоксары: Чувашский государственный аграрный университет, 2021. – С. 398-399. – EDN ETWWSL.*

13 Куц, В. В. Исследование процесса получения отверстий полым электродом на модернизированном электроэрозионном станке ЧПУ / В. В. Куц, М. С. Разумов, Д. А. Зубков, А. С. Бышкин, А. А. Неструев // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2020. № 3. С. 395-402.

14 Рахимьянов, Х. М. Технологические ограничения в электрохимической прошивке отверстий малого диаметра / Х. М. Рахимьянов, С. И. Василевская, К. Х. Рахимьянов // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2018. – № 4(128). – С. 5-16. – DOI 10.26730/1999-4125-2018-4-5-15. – EDN YTRYMP.

15 Рахимьянов, Х. М. Оценка перспектив введения высоковольтных импульсов в процесс электрохимической прошивки отверстий малого диаметра / Х. М. Рахимьянов, С. И. Василевская // *Инновации в машиностроении: Сборник трудов X Международной научно-практической конференции, Кемерово, 26–29 ноября 2019 года / Под редакцией В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2019. – С. 17-22. – EDN KAITES.*

16 Гайсин А.Ф. Парогазовый разряд между струйным электролитическим и металлическим электродами в технологических процессах Школа по плазмохимии для молодых ученых России и стран СНГ https://main.isuct.ru/files/konf/plasma/SECTION5/Gaisin_Kazan.html

17 Попов, А. И. Теоретические предпосылки струйной электролитно-плазменной резки / А. И. Попов, С. А. Кислицын // *Современное машиностроение. Наука и образование*. – 2023. – № 12. – С. 537-552. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id23-557. – EDN BBMSSW.

18 High-Speed Dimensional Processing of Metallic Materials with an Environmentally Friendly Jet Electrolyte-Plasma Method / A. Popov, A. Popova, A. Fumin [et al.] // *Mechanisms and Machine Science (book series)*. - 2022. - Vol. 108 mms. - P. 481-489. – DOI 10.1007/978-3-030-87383-7_52. – EDN SEEEP.

19 Попов, А. И. Технологические аспекты струйной электролитно-плазменной обработки / А. И. Попов, А. И. Попова, Д. А. Попова // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. – 2019. – Т. 25, № 4. – С. 54-70. – DOI 10.18721/JEST.25405. – EDN FVPLWU.

20 Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г. Л. Амитан [и др.]; под. общ. ред. В. А. Волосатова.

21 Словецкий Д.И., Терентьев С.Д. Параметры электрического разряда в электролитах и физико-химические процессы в электролитной плазме // *Химия высоких энергий*. 2003. Т. 37. № 5. С. 355–362.

References

1 Stepanova, T. D. Technological sovereignty of Russia as an element of economic security // *Economic journal Economics: yesterday, today, tomorrow* Volume 12, No. 9A, 2022. p. 567–575.

2 Principles of constructing automated systems for supporting the life cycle of innovative products / A. I. Nadeev, A. I. Popova, A. V. Surina, Yu. K. Svechnikov // *Sensors and systems*. – 2006. – No. 11. – P. 59-63. – EDN KWMQTP.

3 Popova, A. I. Infrastructure complex for supporting entrepreneurship / A. I. Popova // *Law,*

economics and management: theory and practice: Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference, Cheboksary, December 02, 2021 / Ch. editor E.V. Fomin. – Cheboksary: Limited Liability Company “Publishing House “Sreda”, 2021. – P. 148-150. – EDN XXJRQM.

4 Epryntsev, D. V. Electrochemical anodic processing of parts for rocket technology / D. V. Epryntsev, I. M. Vinokurova, V. I. Fedyanin // Current problems of innovative information and security systems: Materials of the international scientific and practical conference, Voronezh, March 28–31, 2010. Volume Part 2. – Voronezh, 2010. – pp. 311-315. – EDN UXLQOJ.

5 Shvaleva, N. A. Analysis of the design of a slotted cathode tool for the electrochemical machining of thin-walled parts / N. A. Shvaleva, A. A. Fadeev // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2022. – No. 29. – P. 14-18. – DOI 10.26160/2474-5901-2022-29-14-18. – EDN FKLXMY.

6 Bukhta, S. N. Solution of technical problems in the implementation of final processing of gas turbine engine blades using the method of electrochemical processing (echo) / S. N. Bukhta, L. A. Pet // Science - production: Annual scientific and technical collection / Under the general editorship V.L. Yuryeva. Volume Issue 10. - UFA: State Educational Institution of Higher Professional Education "Ufa State Aviation Technical University", 2017. - P. 54-68. – EDN ZWKAXT.

7 Shekhanov, R. F. Electrochemical marking of stainless steels / R. F. Shekhanov, M. G. Dontsov, I. V. Bratkov // Modern problems of theoretical and applied electrochemistry. Electrochemistry in the present and future: XIV Plyos International Scientific Conference, abstracts, Plyos, July 03–07, 2023. – Ivanovo: Institute of Chemistry of Solutions named after. G.A. Krestova RAS, 2023. – P. 72. – EDN XGPXSF.

8 Sokolnikov, V. N. Technological features of anodic dissolution in combined hardening treatment during finishing of high-speed rotors / V. N. Sokolnikov, G. A. Sukhochev, S. N. Kodentsev // Hardening technologies and coatings. – 2021. – T. 17, No. 12(204). – pp. 555-557. – DOI 10.36652/1813-1336-2021-17-12-555-557. – EDN XOKLFJ.

9 High-energy laser treatment of plasma coatings from materials based on oxide ceramics / F. I. Panteleenko, V. A. Okovity, O. G. Devoino [et al.] // Progressive technologies and mechanical engineering systems. – 2022. – No. 3(78). – P. 83-88. – EDN TERAJD.

10 Sergeev, N. & Minaev, I. & Tikhonova, I. & Gvozdev, A. & Kolmakov, A. & Sergeev, A. & Kutepov, S. & Malii, D. (2020). Selecting Laser Cutting Modes for Engineering Steel Sheets Aiming at Provision of the Required Properties of Surface Quality. Inorganic Materials: Applied Research. 11.815-822. 10.1134/S2075113320040358.

11 Garagulya, D.V. Advantages of waterjet cutting when cutting sheet metal / D.V. Garagulya // Morskoy Vestnik. – 2017. – No. 4(64). – pp. 37-38. – EDN ZUQMKL.

12 Fomin, V.V. Profiling of high-precision holes / V.V. Fomin // Student science - the first step towards the digitalization of agriculture: Materials of the All-Russian student scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Chuvash State Agrarian University, at 3 o'clock. , Cheboksary, October 15, 2021. Volume Part 2. – Cheboksary: Chuvash State Agrarian University, 2021. – P. 398-399. – EDN ETWWSL.

13 Kuts, V. V. Study of the process of producing holes with a hollow electrode on a modernized CNC electrical discharge machine / V. V. Kuts, M. S. Razumov, D. A. Zubkov, A. S. Byshkin, A. A. Nestruev // News of Tula State University. Technical science. 2020. No. 3. P. 395-402.

14 Rakhimyanov, Kh. M. Technological limitations in the electrochemical firmware of small-diameter holes / Kh. M. Rakhimyanov, S. I. Vasilevskaya, K. Kh. Rakhimyanov // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. – 2018. – No. 4(128). – P. 5-16. – DOI 10.26730/1999-4125-2018-4-5-15. – EDN YTRYMP.

15 Rakhimyanov, Kh. M. Assessment of the prospects for introducing high-voltage pulses into the process of electrochemical piercing of small-diameter holes / Kh. M. Rakhimyanov, S. I. Vasilevskaya // Innovations in mechanical engineering: Collection of proceedings of the X International Scientific and Practical Conference, Kemerovo, 26–November 29, 2019 / Edited by V.Yu. Blumenstein. – Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 2019. – pp. 17-22. – EDN KAITES.

16 Gaisin A.F. Vapor-gas discharge between jet electrolytic and metal electrodes in technological processes School of plasma chemistry for young scientists in Russia and CIS countries https://main.isuct.ru/files/konf/plasma/SECTION5/Gaisin_Kazan.html

17 Popov, A. I. Theoretical premises of jet electrolyte-plasma cutting / A. I. Popov, S. A. Kislitsyn // Modern mechanical engineering. Science and education. – 2023. – No. 12. – P. 537-552. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id23-557. – EDN BBMSSW.

18 High-Speed Dimensional Processing of Metallic Materials with an Environmentally Friendly Jet Electrolyte-Plasma Method / A. Popov, A. Popova, A. Fumin [et al.] // Mechanisms and Machine Science (book series). - 2022. - Vol. 108 mms. - P. 481-489. – DOI 10.1007/978-3-030-87383-7_52. – EDN SEEEEPN.

19 Popov, A. I. Technological aspects of jet electrolyte-plasma processing / A. I. Popov, A. I. Popova, D. A. Popova // Scientific and Technical Journal of SPbPU. Natural and engineering sciences. – 2019. – Т. 25, No. 4. – P. 54-70. – DOI 10.18721/JEST.25405. – EDN FVPLWU.

20 Handbook of electrochemical and electrophysical processing methods / G. L. Amitan [et al.]; under. total ed. V. A. Volosatova.

21 Slovetsky D.I., Terentyev S.D. Parameters of electric discharge in electrolytes and physico-chemical processes in electrolyte plasma // High Energy Chemistry. 2003. Т. 37. No. 5. pp. 355–362.

© Попов А.И., 2023