

Особенности локальной плазменно-электролитной обработки боковой поверхности вращающегося цилиндра

С. А. Кусманов^{a,b*}, С. Ю. Шадрин^b, И. В. Тамбовский^{a,b}, Т. Л. Мухачева^{a,b},
Т. М. Голубева^a, Н. Л. Смирнова^b, С. Н. Григорьев^a

^aМосковский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, 127994, Россия

^bКостромской государственный университет, г. Кострома, 156005, Россия

*e-mail: sakusmanov@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.12.2024

После доработки 29.01.2025

Принята к публикации 31.01.2025

Рассмотрены особенности локальной плазменно-электролитной обработки струйной подачей электролита на боковую поверхность вращающегося цилиндра из малоуглеродистой стали. Изучено влияние гидродинамических параметров обработки и напряжения на электро- и теплофизические характеристики процесса. Установлены необходимые значения скорости расхода электролита, диаметра сопла и расстояния между спрейером и обрабатываемой поверхностью, которые отвечают разработанным условиям эффективности локальной плазменно-электролитной обработки. Получены вольт-амперные и вольт-температурные характеристики процесса, имеющие общие закономерности с обработкой методом погружения при смещении диапазона рабочего напряжения в сторону больших значений. Разработана методика определения теплового потока, направленного в металлический образец, при локальной обработке струей электролита, по данным температурных измерений, выполненных вне нагреваемой области, с применением которой изучены особенности теплообмена в системе электролит–парогазовый слой–вращающийся цилиндр–электрод.

Ключевые слова: плазменно-электролитная обработка, локальная обработка, струйная обработка, нагрев, сталь 20, модель, тепловые потоки

УДК 544.558+66.088

<https://doi.org/10.52577/eom.2025.61.1.030>

ВВЕДЕНИЕ

Плазменно-электролитная обработка применяется для модифицирования металлических поверхностей в различных отраслях промышленности. Для ее реализации в большинстве случаев применяется способ погружения обрабатываемой детали в электролизер с электролитом, когда обрабатываемая деталь и корпус электролизера подключаются к источнику тока [1–6]. Ввиду значительных различий площадей поверхности детали и электролизера (площадь поверхности электролизера должна быть примерно на два порядка больше площади поверхности обрабатываемой детали), подача напряжения приводит к выделению практически всей мощности вокруг обрабатываемой детали и формированию вокруг нее сплошного парогазового слоя. Образующаяся парогазовая оболочка является теплогенерирующим элементом системы и позволяет разогревать поверхность до температур более 1000 °С со скоростью более 100 °С/с, что дает возможность проводить химико-термическую обработку [7–10]. Кроме диффузионного насыщения поверхности азотом, углеродом, бором, серой с возможной последующей закалкой в электро-

лите, изменяя электрофизические и гидродинамические параметры обработки, а также составы электролитов, можно проводить плазменно-электролитное полирование [11–16] и плазменно-электролитное (микродуговое) оксидирование [17–24].

Технология обработки способом погружения удобна для обработки малогабаритных деталей простых форм. Для расширения класса обрабатываемых изделий, в первую очередь крупногабаритных изделий, деталей сложных форм и внутренних поверхностей, актуальным видится развитие технологий локальной плазменно-электролитной обработки. Обработка подачей струи электролита на обрабатываемую поверхность с формированием зоны нагрева позволит не только провести модифицирование сложноформатных деталей, но и снизить ресурсо- и энергопотребление.

Локальные методы обработки нашли применение в модифицировании поверхностей различных материалов [25–35]. К преимуществам данных технологий относятся точность и скорость обработки, а также более широкие технологические возможности. Модифицированием в струе электролита возможно решать задачи поверхностного диффузионного

насыщения, закалки, прошивки отверстий, фигурной резки, размерной обработки, формирования покрытий и получения наноповерхностей [36]. Отдельным направлением в применении локальной обработки может стать нанесение дискретных покрытий [37]. В то же время технологии локальной обработки не получили широкого распространения. Одной из причин видится недостаточная изученность особенностей формирования парагазового слоя, развития и функционирования электролитной плазмы, распределения температурного поля на поверхности детали.

Данная работа направлена на изучение особенностей локальной плазменно-электролитной обработки боковой поверхности вращающегося цилиндра, включая исследование влияние гидродинамических условий и напряжения на электро- и теплофизические характеристики процесса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Локальной обработке подвергали боковую поверхность вращающегося цилиндрического образца из стали 20 диаметром 11 мм и длиной 50 мм в водном растворе хлорида аммония (10%) в качестве электролита. Обработка осуществлялась в электролизере, применяемом для обработки деталей способом погружения [38], в котором была модернизирована рабочая камера – установлены спрейер в патрубок для подачи электролита в электролизер и механизм для фиксации и управления обрабатываемым образцом (рис. 1).



Рис. 1. Схема установки для локальной обработки.

В процессе локальной обработки электролит подавался из спрейера, устанавливаемого через резьбовое соединение в патрубок электролизера, через сопла разного диаметра на обрабатываемый участок поверхности детали в виде струи. Спрейер представляет собой тонкостенную трубу из нержавеющей стали с внутренним диаметром 50 мм, установленную верти-

кально в полимерном поддоне для сбора раствора электролита. Верхний конец трубы перекрывается соплом – полимерной заглушкой с отверстием. Раствор электролита нагнетается внутрь с помощью насоса через нижний конец трубы. Проходя через отверстие в заглушке раствор формирует струю, направленную вертикально вверх. Обрабатываемая деталь, которая подключается к положительному полюсу источника тока, размещается над выходным отверстием сопла. Напряжение подается на деталь и на корпус трубы спрейера, который подключается к отрицательному полюсу источника тока. Таким образом, электрический ток протекает в электрической цепи, сформированной подводящими проводами, обрабатываемой деталью, стенкой трубы, раствором электролита, заполняющим трубу, и струей электролита.

Учитывая диапазон прикладываемых напряжений при выполнении обработки, в качестве источника тока использовался блок питания ГОРН-К-360В/20А с диапазоном выходного напряжения 0–360 В и силой тока до 20 А. Контроль процесса осуществлялся вольтметром DP6-DV и амперметром DP6-DA.

Система крепления обрабатываемой детали предусматривает возможность ее перемещения в вертикальном направлении линейным приводом с двигателем постоянного тока, что позволяет плавно изменять расстояние от выходного отверстия сопла до обрабатываемой поверхности. Вращательное движение обрабатываемой детали реализуется путем установки последней в патрон, приводимый во вращение электродвигателем, оснащенным регулятором частоты вращения.

Для управления температурой электролита использовался цифровой терморегулятор ХН-W3002 с датчиком температуры NTC с сопротивлением 10 кОм (точность измерения составляла $\pm 1^\circ\text{C}$). Также был предусмотрен контроль температуры электролита и проточной воды для охлаждения с помощью мультиметров АРРА109N и хромель-алюмелевых термопар МУ-К2. Термопары располагаются в патрубке на входе во внутренний контур электролизера для контроля температуры электролита и в центре теплообменника для контроля температуры проточной воды.

Для измерения расхода электролита использовался расходомер турбинного типа с корпусом и крыльчаткой из полимерных материалов.

Измерение температуры нагрева выполнялось с помощью инфракрасного пирометра Кельвин АРТО 1300 А. Температура нагрева вращаю-

щегося образца измерялась на его поверхности в области выхода из зоны контакта со струей электролита.

Температура электролита измерялась с помощью термометров сопротивления, размещенных в патрубке на входе в формирователь струи и в патрубке, забирающем раствор из поддона.

Для изучения теплофизических особенностей локальной обработки были разработаны методики расчета распределения тепловых потоков, подаваемых в металлический вращающийся образец и в электролит.

В теплофизической модели обрабатываемая деталь рассматривается как однородный цилиндрический стержень заданной длины l , горизонтально закрепленный одним концом во вращающемся металлическом патроне. В месте контакта струи со стержнем действует постоянный тепловой поток Q , на остальной боковой поверхности происходит теплообмен с окружающей средой по закону Ньютона. Металлический патрон с высокой степенью точности является идеальным проводником тепла, тогда теплообмен на закрепленном торце описывается законом Ньютона, а теплообменом на свободном торце пренебрегаем. Так как длина стержня на порядок больше его радиуса, радиальный тепловой поток можно не учитывать и считать задачу одномерной.

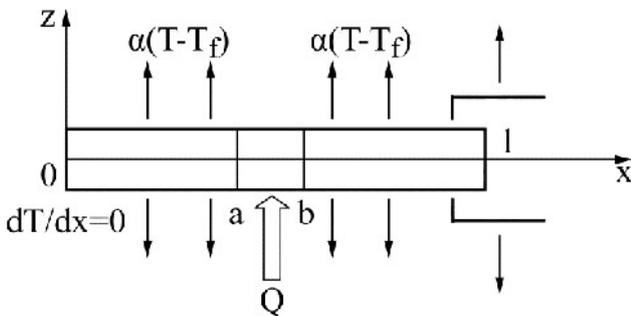


Рис. 2. Схема расчета температуры при обработке.

В процессе обработки струя электролита подается на некотором расстоянии от торцов цилиндрического образца, поэтому необходимо рассматривать три области (рис. 2): область со свободным торцом ($0 \leq x \leq a$), область действия постоянного теплового потока ($a \leq x \leq b$) и область с закрепленным торцом ($b \leq x \leq l$). В каждой из областей необходимо решать уравнение теплопроводности со своими граничными условиями. На границе областей следует применить граничные условия четвертого рода. На основании принятых допущений получена следующая краевая задача для трех областей:

Область I:

$$\frac{d^2\theta_1}{dx^2} - m_1^2\theta_1 = 0,$$

$$\theta_1 = T_1 - T_f, m_1 = \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda R}},$$

$$x = 0, \frac{d\theta_1}{dx} = 0,$$

$$x = a, T_1 = T_2, \frac{dT_1}{dx} = \frac{dT_2}{dx},$$

$$x = b, T_2 = T_3, \frac{dT_2}{dx} = \frac{dT_3}{dx},$$

Область II:

$$\frac{d^2\theta_2}{dx^2} - m_2^2\theta_2 = 0,$$

$$\theta_2 = T_2 - T_f - \frac{q}{\alpha}, m_2 = \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda R}},$$

Область III:

$$\frac{d^2\theta_3}{dx^2} - m_1^2\theta_3 = 0,$$

$$\theta_3 = T_3 - T_f, m_1 = \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda R}}, \quad (1)$$

$$x = l, \frac{d\theta_3}{dx} + h\theta_3 = 0,$$

где a, b – границы области нагрева стержня; h – коэффициент ($h = \alpha/\lambda$); m_1 – коэффициент ($m = (2\alpha/\lambda l)^{1/2}$); m_2 – коэффициент ($m = (\alpha/\lambda l)^{1/2}$); l – длина стержня; R – радиус стержня; T_1 – температура стержня в области I; T_2 – температура стержня в области II; T_3 – температура стержня в области III; T_f – температура окружающей среды; q – плотность теплового потока; x – горизонтальная координата; α – коэффициент теплоотдачи от нагреваемого стержня к окружающему воздуху; λ – коэффициент теплопроводности стержня; θ_1 – температурный напор в области I; θ_2 – условный температурный напор в области II; θ_3 – температурный напор в области III.

Решением приведенных обыкновенных дифференциальных уравнений являются следующие функции:

$$\begin{aligned} \theta_1(x) &= C_1 \operatorname{ch}(m_1 x) + C_2 \operatorname{sh}(m_1 x), \\ \theta_2(x) &= D_1 \operatorname{ch}(m_2 x) + D_2 \operatorname{sh}(m_2 x), \\ \theta_3(x) &= B_1 \operatorname{ch}(m_1 x) + B_2 \operatorname{sh}(m_1 x), \end{aligned} \quad (2)$$

где $B_1, B_2, C_1, C_2, D_1, D_2$ – постоянные интегрирования; $\operatorname{ch}(x), \operatorname{sh}(x)$ – гиперболические косинус и синус.

Постоянные интегрирования находятся из граничных условий на торцах и на внутренних границах областей. После несложных преобразований можно получить распределения температуры в указанных областях. Так как данные формулы достаточно громоздки, то имеет место

ограничение выражениями для постоянных интегрирования:

$$C_1 = \frac{D_1 a'_2 + D_2 a'_3}{a'_1}, C_2 = 0,$$

$$B_1 = \frac{D_1 b'_2 + D_2 b'_3}{b'_1},$$

$$B_2 = -\frac{m_1 \text{sh}(m_1 l) + h \text{ch}(m_1 l)}{m_1 \text{ch}(m_1 l) + h \text{sh}(m_1 l)} \cdot \frac{D_1 b'_2 + D_2 b'_3}{b'_1},$$

$$D_1 = \frac{q}{\alpha} \frac{a'_1 (b'_3 b_1 - b'_1 b_3) - b'_1 (a'_3 a_1 - a'_1 a_3)}{\Delta},$$

$$D_2 = \frac{q}{\alpha} \frac{b'_1 (a'_2 a_1 - a'_1 a_2) - a'_1 (b'_2 b_1 - b'_1 b_2)}{\Delta},$$

где введены следующие обозначения:

$$\Delta = (a'_2 a_1 - a'_1 a_2)(b'_3 b_1 - b'_1 b_3) - (a'_3 a_1 - a'_1 a_3)(b'_2 b_1 - b'_1 b_2),$$

$$a_1 = \text{ch}(m_1 a),$$

$$a_2 = \text{ch}(m_2 a),$$

$$a_3 = \text{sh}(m_2 a),$$

$$a'_1 = m_1 \text{sh}(m_1 a),$$

$$a'_2 = m_2 \text{sh}(m_2 a),$$

$$a'_3 = m_2 \text{ch}(m_2 a),$$

$$b_1 = \text{ch}(m_1 b) - \frac{m_1 \text{sh}(m_1 l) + h \text{ch}(m_1 l)}{m_1 \text{ch}(m_1 l) + h \text{sh}(m_1 l)} \text{sh}(m_1 b),$$

$$b_2 = \text{ch}(m_2 b), b_3 = \text{sh}(m_2 b),$$

$$b'_1 = m_1 \text{sh}(m_1 b) - \frac{m_1 \text{sh}(m_1 l) + h \text{ch}(m_1 l)}{m_1 \text{ch}(m_1 l) + h \text{sh}(m_1 l)} m_1 \text{ch}(m_1 b),$$

$$b'_2 = m_2 \text{sh}(m_2 b), b'_3 = m_2 \text{ch}(m_2 b). \quad (3)$$

Сами распределения температуры могут быть получены подстановкой постоянных интегрирования из (3) в (2) с учетом выражений для температурного напора в каждой из областей.

Для определения теплового потока, поступающего в обрабатываемую деталь, необходимо определить значение температуры в нескольких точках образца на разном удалении от центра вне области нагрева. Аппроксимируя методом наименьших квадратов полученные экспериментальные данные выражениями (2) и (3), можно определить значение теплового потока при подаче на металлический вращающийся образец и коэффициент конвективной теплоотдачи от образца к окружающему воздуху.

Определение теплового потока, направленного в электролит, осуществляется из предположения, что все тепло, переданное в электролит парогазовым слоем (или оболочкой в случае погружения детали в электролит), являющимся теплогенерирующим элементом системы и разделяющим в месте нагрева поверхность от электролита, уносится охлаждающей водой. В соответствии с уравнением теплового баланса тепловой поток, поступающий в

электролит, может быть определен с помощью следующей формулы:

$$Q_{\text{эл}} = c\rho G(T_{\text{эл}2} - T_{\text{эл}1}), \quad (4)$$

где c – удельная теплоемкость воды; ρ – плотность воды; G – расход воды в теплообменнике; $T_{\text{эл}1}$ – температура электролита на выходе из теплообменника (до контакта с обрабатываемой поверхностью); $T_{\text{эл}2}$ – температура электролита на входе в теплообменник (после контакта с обрабатываемой поверхностью).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Электро- и теплофизические особенности локальной обработки вращающегося цилиндрического образца изучались при постоянном напряжении 220 В и различных гидродинамических параметрах: варьировались расстояние между спреером и обрабатываемой поверхностью, диаметр выходного отверстия сопла и скорость расхода электролита. В процессе обработки измерялись значения тока в системе с последующим расчетом выделяемой для нагрева мощности, температуры электролита на выходе из теплообменника (температура электролита до контакта с обрабатываемой поверхностью) и на входе в теплообменник (после контакта с обрабатываемой поверхностью) для расчета теплового потока из парогазового слоя в электролит, а также распределения температуры обрабатываемой поверхности от центра области контакта с электролитом к торцам образца для расчета теплового потока, направленного в металл.

Предварительно были установлены ограничения, при которых не образуется парогазовый слой: расстояние между спреером и обрабатываемой поверхностью, а также диаметр выходного отверстия сопла должны быть не менее 5 мм. Отталкиваясь от этого, изучение влияния гидродинамических параметров обработки на электро- и теплофизические характеристики процесса проводилось при следующих ограничениях:

- диаметр выходного отверстия сопла: 5–9 мм;
- расстояние между спреером и обрабатываемой поверхностью: 5–15 мм;
- скорость расхода электролита: от минимально достижимой до определения экстремума или максимально достижимой при варьировании вышеуказанных параметров (это связано с тем, что увеличение расстояния между спреером и обрабатываемой поверхностью и диаметра выходного отверстия сопла требует повышения скорости расхода электролита).

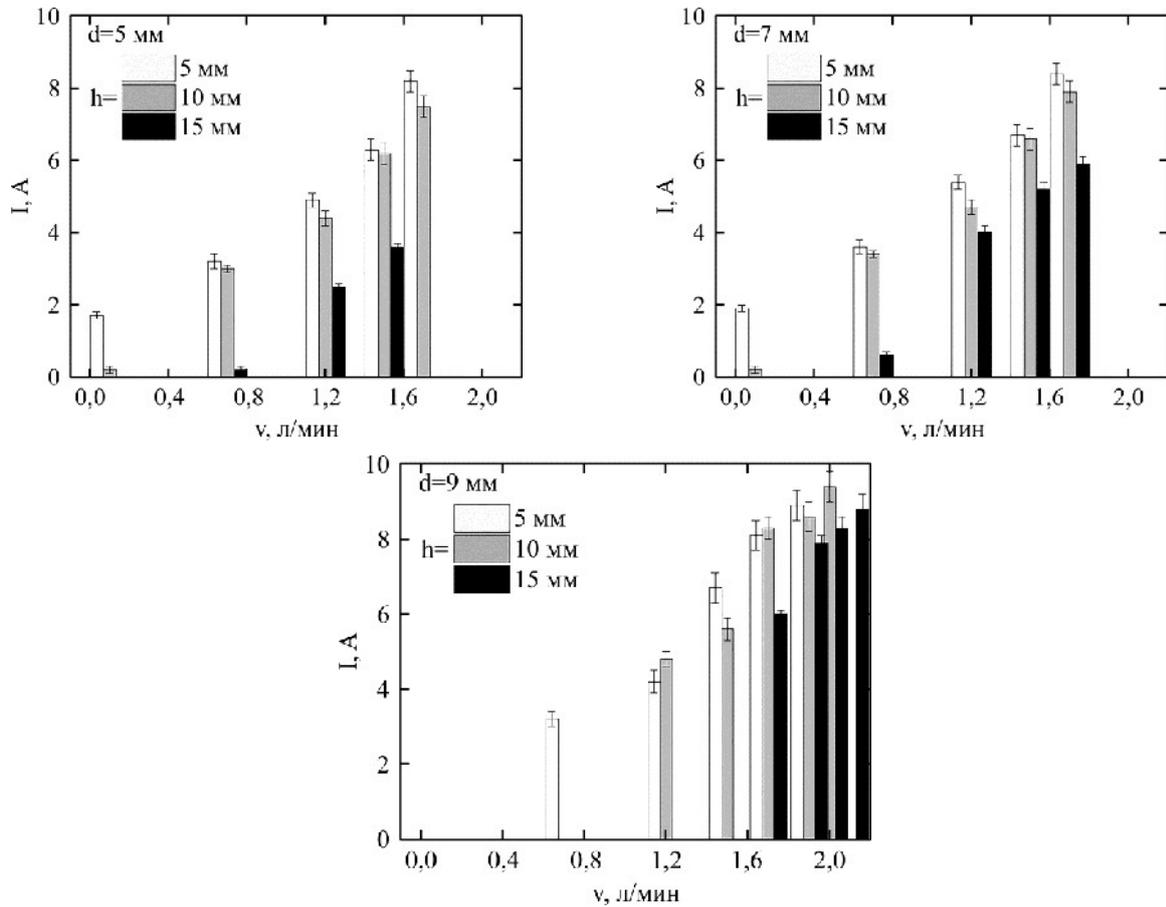


Рис. 3. Зависимость силы тока от скорости расхода электролита при различных расстояниях между спрейером и обрабатываемой поверхностью и диаметрах выходного отверстия сопла в процессе обработки.

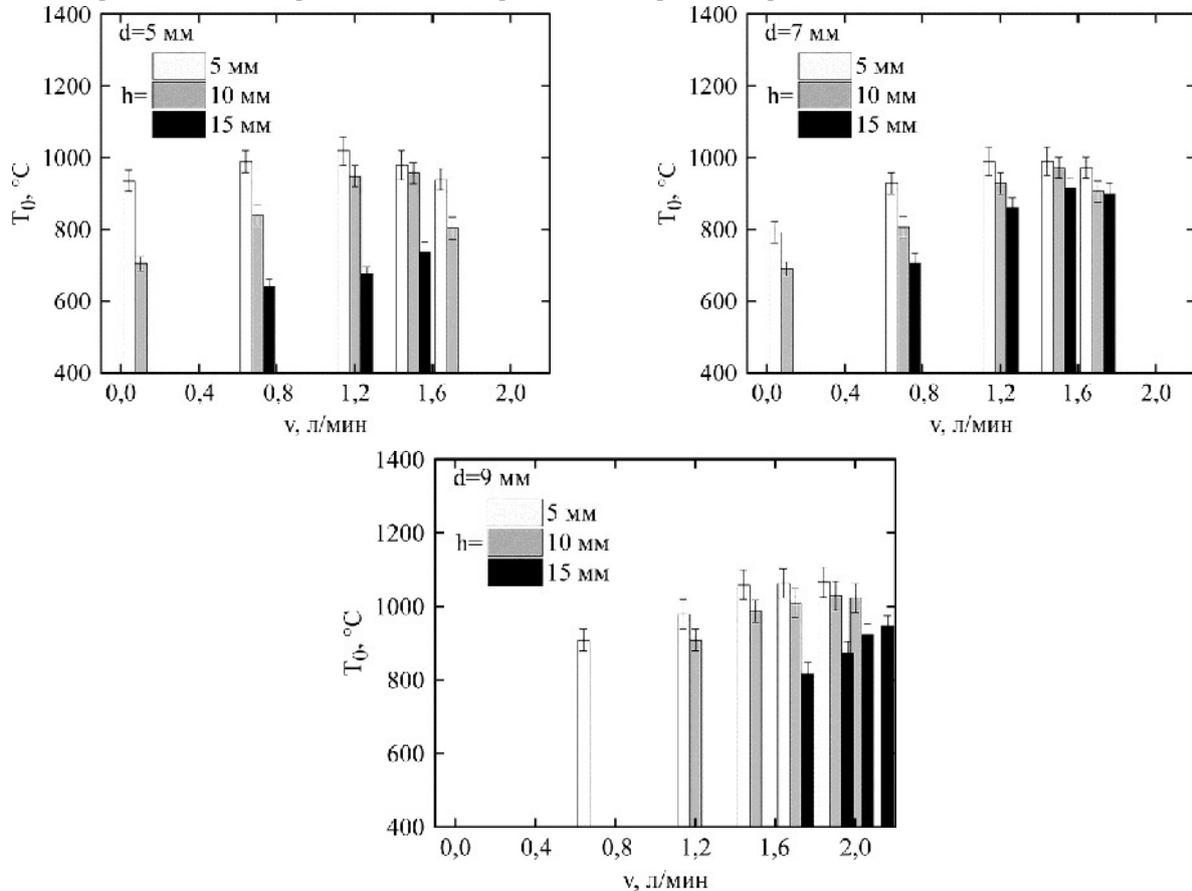


Рис. 4. Зависимость температуры нагрева в центре области контакта от скорости расхода электролита при различных расстояниях между спрейером и обрабатываемой поверхностью и диаметрах выходного отверстия сопла в процессе обработки.

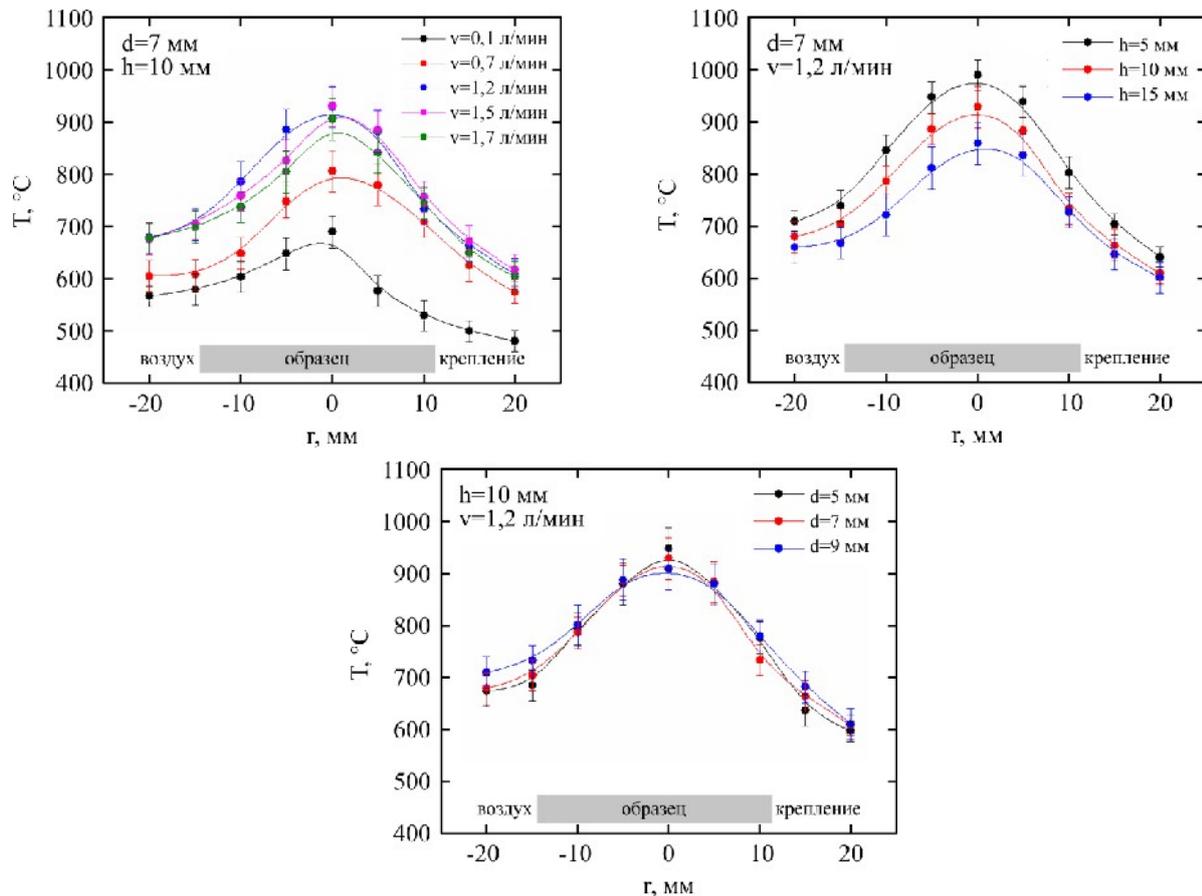


Рис. 5. Зависимость распределения температуры нагрева вдоль боковой поверхности вращающегося образца от центра области контакта при варьировании гидродинамических параметров обработки (координата $-r$ – расстояние от центра области контакта к свободному торцу, координата $+r$ – расстояние от центра области контакта к закреплённому торцу).

По результатам исследования был выявлен ряд закономерностей влияния гидродинамических параметров на ток и выделяемую мощность, а также температуру нагрева.

Увеличение скорости расхода электролита приводит к росту значения тока (рис. 3) и выделяемой в системе мощности. Такая закономерность связана с тем, что расход электролита определяет интенсивность отвода тепла из приэлектродной зоны, в которой образуется парогазовый слой. Увеличение интенсивности охлаждения будет способствовать утонению парогазового слоя, который имеет низкую электропроводность, и снижению сопротивления в системе, вызывая рост тока при постоянном напряжении. Такое же объяснение справедливо и для зависимости температуры нагрева, которая имеет экстремумы в диапазоне от 1,2 до 1,7 л/мин, от скорости расхода (рис. 4). Невысокие скорости расхода электролита не обеспечивают достаточное охлаждение приэлектродной области и способствуют утолщению парогазового слоя, снижая ток и выделяемую в системе мощность, производной которой будет являться теплота, идущая на нагрев обрабатываемой поверхности. При высоких скоростях расхода электролита происходит его растекание по

поверхности вне области нагрева, приводя к охлаждению поверхности и отводу тепла в электролит.

Измерение температуры нагрева на различном расстоянии от центра области контакта электролита выявило тенденцию ее снижения к торцам образца, причем со стороны закрепленного торца наблюдается большее падение температуры ввиду отвода тепла через металлический проводник (рис. 5).

Увеличение расстояния между спрейером и обрабатываемой поверхностью приводит к снижению – силы тока (рис. 3) и выделяемой в системе мощности, а также температуры нагрева (рис. 4). Это связано с уменьшением давления струи электролита на парогазовый слой и интенсивности охлаждения приэлектродной области, что приводит к утолщению парогазового слоя и повышению сопротивления в системе.

При варьировании диаметра выходного отверстия сопла наблюдается компенсационный эффект, когда при увеличении диаметра и, соответственно, площади поперечного сечения струи электролита и области контакта с обрабатываемой поверхностью для образования парогазового слоя с нагревом поверхности требуется увеличение скорости расхода

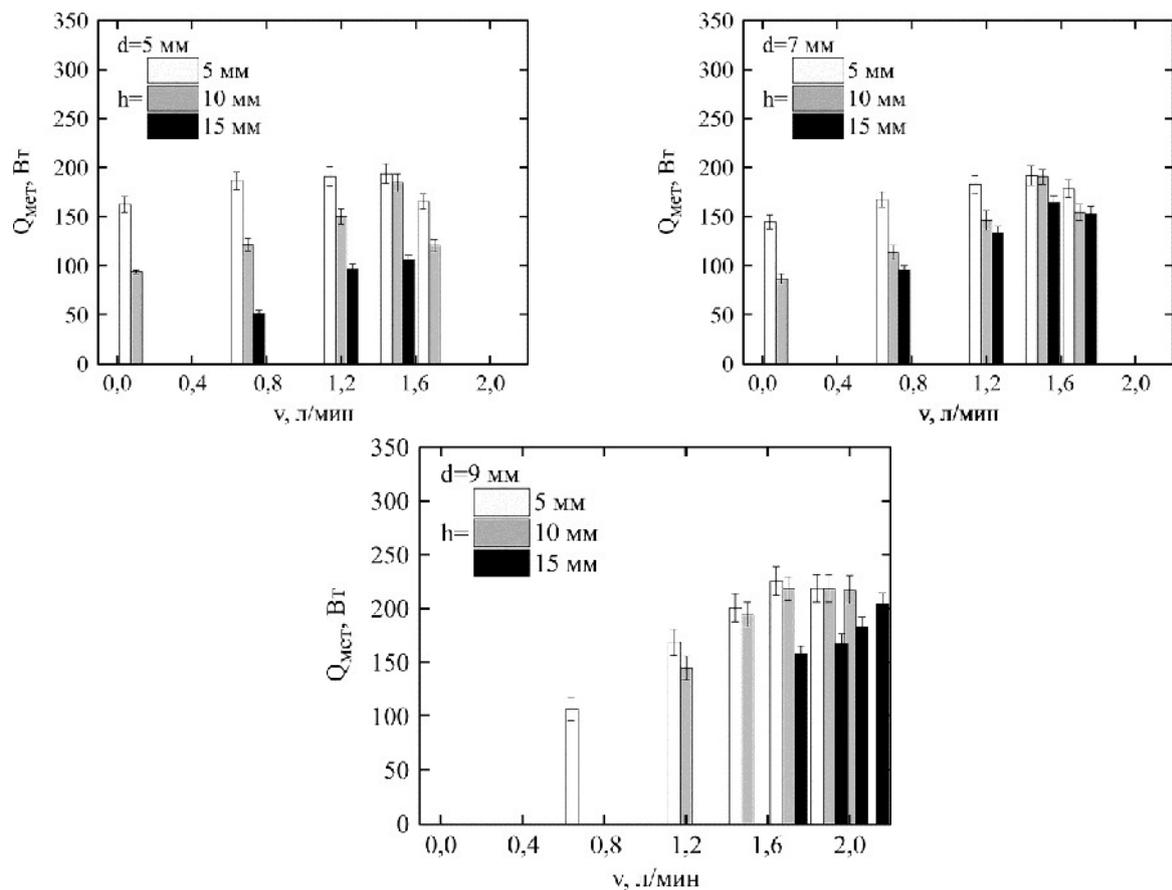


Рис. 6. Зависимость теплового потока, направленного в металлический образец, от скорости расхода электролита при различных расстояниях между спреером и обрабатываемой поверхностью и диаметрах выходного отверстия сопла в процессе локальной обработки.

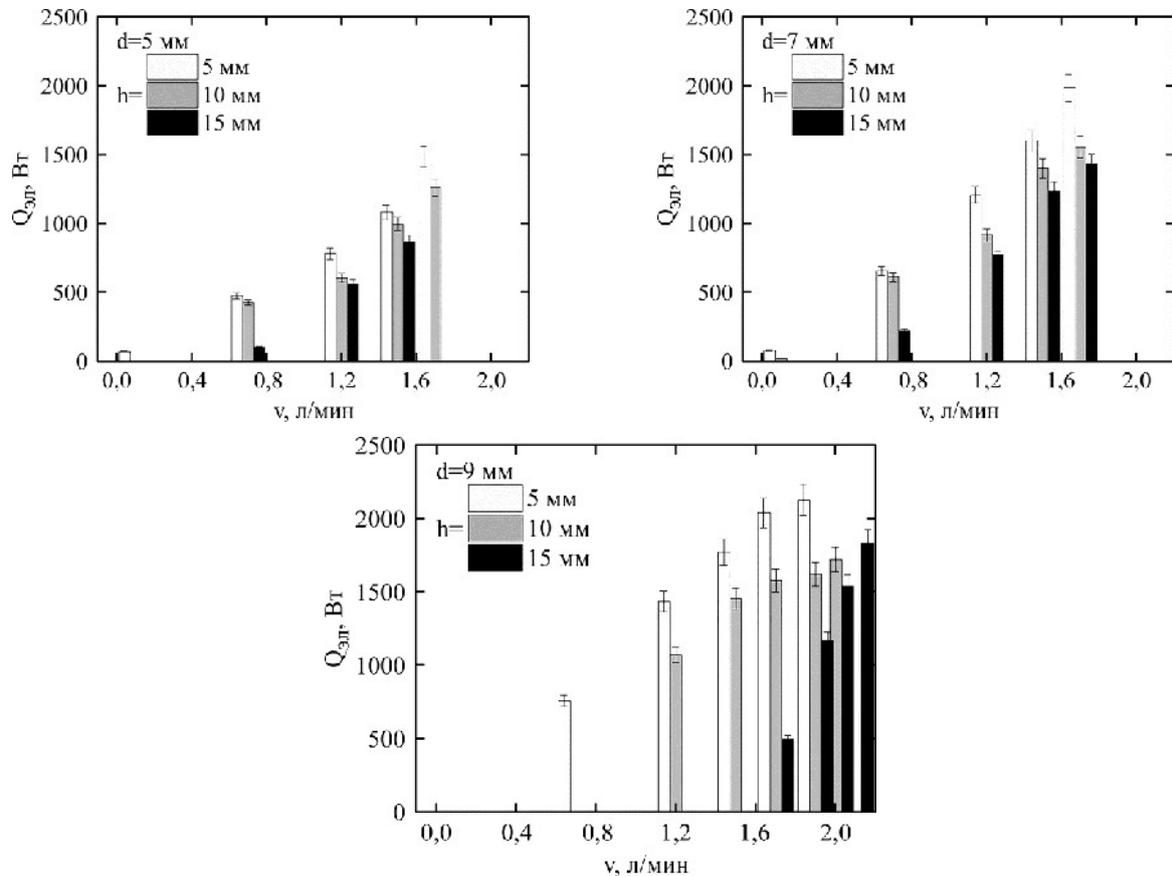


Рис. 7. Зависимость теплового потока, направленного в электролит, от скорости расхода электролита при различных расстояниях между спреером и обрабатываемой поверхностью и диаметрах выходного отверстия сопла в процессе локальной обработки.

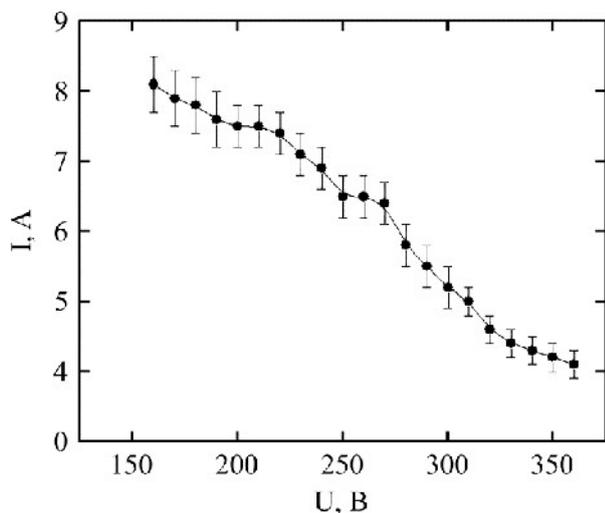


Рис. 8. Вольт-амперная характеристика процесса локальной обработки.

электролита. Это приводит к тому, что для скорости расхода электролита до 1,2 л/мин включительно увеличение диаметра сопла влечет за собой снижение значений тока (рис. 3) и температуры нагрева (рис. 4), а при больших скоростях наблюдается обратная закономерность. Данный факт можно объяснить тем, что диаметр сопла оказывает меньшее влияние на площадь обрабатываемой поверхности (нагрев осуществляется по всей боковой поверхности образца по ширине струи электролита), и вклад других параметров обработки будет превалировать.

Расчеты тепловых потоков, направленных в металлический образец, при различных гидродинамических параметрах показали корреляцию с закономерностями влияния параметров обработки на температуру нагрева (рис. 6). Определены экстремумы, которые смещаются в сторону более высоких скоростей расхода электролита при увеличении расстояния между спрейером и обрабатываемой поверхностью, что, в свою очередь, требует более высоких скоростей расхода электролита для обеспечения достаточного охлаждения. При низких скоростях происходит недостаточное охлаждение приэлектродной области, а при высоких отмечается растекание электролита по поверхности.

Зависимость теплового потока, направленного в электролит, от гидродинамических параметров обработки коррелирует с закономерностями изменения силы тока и выделяемой в системе мощности (рис. 7): величина теплового потока растет при увеличении скорости расхода электролита и диаметра выходного отверстия сопла, а также при уменьшении расстояния между спрейером и обрабатываемой поверхностью. Такая корреляция определяется тем, что значительно большая доля выделяемой паро-

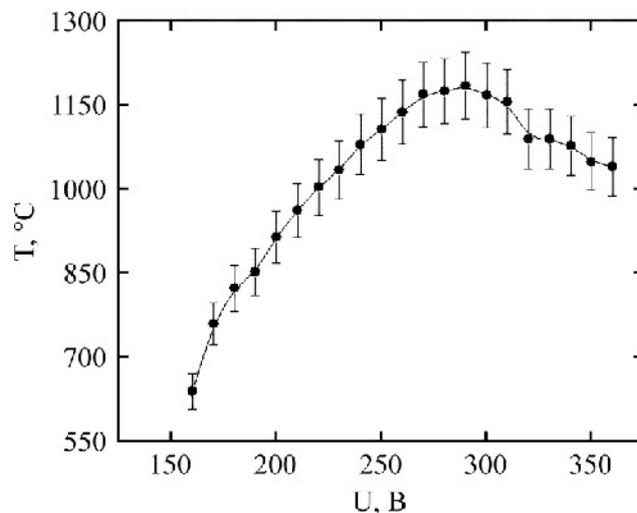


Рис. 9. Вольт-температурная характеристика процесса локальной обработки.

газовым слоем теплоты идет на нагрев электролита. Соответственно, данный показатель будет зависеть от величины выделяемой в системе мощности.

На основании полученных результатов было установлено, что наиболее эффективно будет протекать локальная обработка вращающегося цилиндра при скоростях расхода электролита 1,2–1,5 л/мин при всех варьируемых диаметрах сопла и расстоянии между спрейером и обрабатываемой поверхностью, при этом с увеличением расстояния и диаметра сопла необходимо повышать скорость расхода электролита. Такие условия будут обеспечивать невысокие значения тока и малое электрохимическое растворение стали, которое будет протекать согласно следующей реакции:



Малые значения тока, в свою очередь, будут определять небольшие мощности, снижая энергоемкость обработки. Температура нагрева при этом будет достаточной для проведения химико-термической обработки.

Проводились измерения вольт-температурных и вольт-амперных характеристик локальной обработки при следующих гидродинамических условиях, которые были определены как наиболее эффективные: диаметр выходного отверстия сопла – 5 мм, расстояние между спрейером и обрабатываемой поверхностью – 5 мм, скорость расхода электролита – 1,2 л/мин.

Установлено, что образование парогазового слоя и нагрев поверхности возможны при напряжении 160 В и выше. При данном критическом напряжении происходит переход электролиза в режим стационарного нагрева с образованием сплошного парогазового слоя, отделяющего обрабатываемую поверхность от

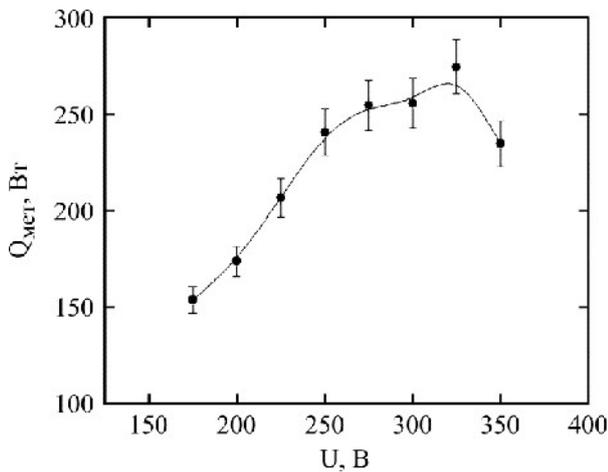


Рис. 10. Зависимость теплового потока, направленного в металлический образец, от напряжения.

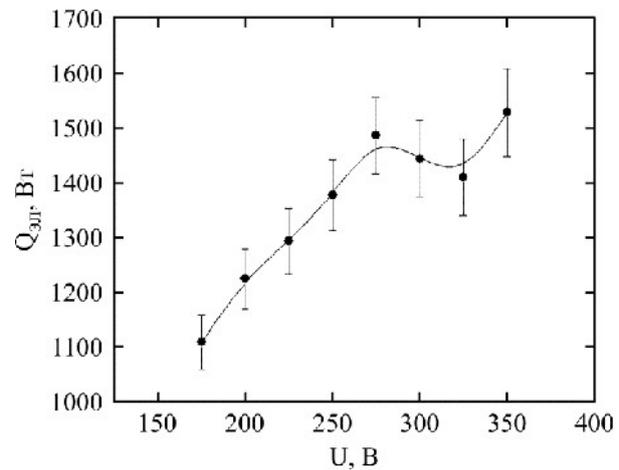


Рис. 11. Зависимость теплового потока, направленного в электролит, от напряжения.

электролита. С увеличением напряжения наблюдается монотонное снижение силы тока (рис. 8), что характерно для режима стационарного нагрева при обработке погружением [39, 40]. Принято считать, что повышение напряжения приводит к интенсификации образования пара при кипении и соответствующему возрастанию толщины парогазового слоя, увеличивающему его сопротивление. В этом режиме парогазовый слой остается сплошным и устойчивым на всем варьируемом интервале напряжений.

Вольт-температурная характеристика имеет максимум при напряжении 290 В (рис. 9). Восходящая ветвь характеристики отражает рост температуры при монотонном повышении мощности, выделяемой в парогазовом слое. На этом участке рост напряжения превалирует над уменьшением силы тока. Согласно результатам измерений, указанная мощность увеличивается от 1,3 кВт при 160 В до 1,6 кВт при 290 В. При дальнейшем увеличении напряжения температура нагрева снижается вопреки росту выделяемой мощности. Из этого следует, что в системе происходит перераспределение энергии и доля тепла, поступающего в металлическую деталь, начинает уменьшаться. Возможной причиной может быть возрастание амплитуды колебаний межфазной границы парогазовый слой–электролит, вызванных электрогидродинамической неустойчивостью. Именно наличие неустойчивости границы обеспечивает возможность ионам электролита эмитировать в парогазовый слой под действием электрического поля. Важно отметить, что поверхность раздела между электролитом и парогазовым слоем в электрическом поле неизбежно деформируется. На поверхности электролита образуются относительно долговременные гидродинамические выступы и кратковременные конусы Тейлора с избыточным зарядом, который эмитируется в парогазовый

слой. Увеличение напряжения выше некоторого значения приводит к сдвигу зон различной проводимости внутри парогазового слоя и росту пульсаций межфазной границы, совместное влияние обоих факторов способствует снижению температуры нагрева, вызванному сдвигом уровня поверхности максимальной температуры внутри парогазового слоя.

Расчеты тепловых потоков, направленных в металлический образец, показывают прямо пропорциональную связь температуры нагрева и теплового потока (рис. 10). Таким образом, увеличение температуры нагрева приводит к линейному росту теплового потока, подаваемого в металл.

При стационарном нагреве выделяемая в системе мощность при постоянном тепловом потоке в атмосферу будет распределяться между тепловыми потоками, направляющимися в электролит и металлический образец. При увеличении напряжения до максимальной температуры нагрева с ростом теплового потока, направленного в металлический образец, растет и выделяемая в системе мощность, что приводит к повышению теплового потока в электролит (рис. 11). При дальнейшем увеличении напряжения продолжает расти выделяемая мощность при снижении теплового потока в образец, что приводит к продолжению роста теплового потока в электролит.

ВЫВОДЫ

1. Проведено изучение влияния гидродинамических параметров локальной обработки на электрофизические характеристики процесса на примере обработки боковой поверхности вращающегося цилиндрического образца из стали 20 в водном растворе хлорида аммония (10%). Установлены минимальные значения диаметра выходного отверстия сопла и расстояния между спрейером и обрабатываемой

поверхностью – по 5 мм, ниже которых парогазовый слой не формируется. Показано, что увеличение диаметра сопла и расстояния между спрейером и обрабатываемой поверхностью требует повышения скорости расхода электролита для поддержания устойчивости парогазового слоя. На основе установленных зависимостей силы тока, выделяемой в системе мощности и температуры нагрева от гидродинамических параметров обработки были определены их комбинации, которые отвечают разработанным условиям эффективности: минимальное значение силы тока при максимально достижимой температуре нагрева. Под такие условия подпадает обработка при скоростях расхода электролита 1,2–1,5 л/мин для значений диаметра сопла 5–9 мм и расстояния между спрейером и обрабатываемой поверхностью 5–15 мм.

2. Получены вольт-температурные и вольт-амперные характеристики процесса локальной обработки при эффективных гидродинамических условиях. Определено, что переход в режим стационарного нагрева с образованием парогазового слоя при локальной обработке происходит при более высоком напряжении (160 В), чем при обработке методом погружения. С увеличением напряжения наблюдаются монотонное снижение силы тока и повышение температуры нагрева до максимального значения при 290 В, связанные с ростом выделяемой мощности, расширением парогазового слоя и повышением сопротивления в системе электролит–парогазовый слой–металл, что характерно для режима стационарного нагрева при обработке погружением.

3. Изучены особенности теплообмена в системе электролит–парогазовый слой–вращающийся цилиндр–электрод в условиях локальной плазменно-электролитной обработки струйной подачей электролита на обрабатываемую боковую поверхность.

Предложены модели расчета распределения температуры по боковой поверхности вращающегося цилиндра при локальной обработке, на основании которых разработана методика определения теплового потока, направленного в металлический образец.

Изучено влияние гидродинамических параметров обработки на распределение тепловых потоков. Показана корреляция тепловых потоков, подаваемых в обрабатываемый образец, с температурой нагрева. При варьировании скорости расхода электролита были определены экстремумы, которые смещаются в сторону более высоких скоростей при увеличении расстояния между спрейером и

обрабатываемой поверхностью. Зависимость теплового потока, направляющегося в электролит, от гидродинамических параметров обработки коррелирует с закономерностями изменения силы тока и выделяемой в системе мощности в связи с тем, что значительно большая доля выделяемой парогазовым слоем теплоты идет на нагрев электролита.

Изучено влияние напряжения на распределение тепловых потоков. Показана корреляция распределения температуры по обрабатываемой поверхности с вольт-температурными характеристиками, что определяет прямо пропорциональную связь температуры нагрева и теплового потока, подаваемого из парогазового слоя в обрабатываемый образец. Зависимость теплового потока, направляющегося в электролит, от напряжения определяется растущей величиной выделяемой мощности.

Полученные результаты позволили расширить имеющиеся представления о явлении плазменного электролиза и создать теплофизическую основу для дискретного химико-термического упрочнения локальных участков поверхности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00391 с использованием оборудования Центра коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tambovskiy, I., Mukhacheva, T., Gorokhov, I., Suminov, I., et al., Features of cathodic plasma electrolytic nitrocarburizing of low-carbon steel in an aqueous electrolyte of ammonium nitrate and glycerin, *Metals*, 2022, vol. 12, art. ID 1773. <https://doi.org/10.3390/met12101773>
2. Bayatanova, L., Rakhadilov, B., Kurbanbekov, S., Skakov, D., et al., Fine structure of low-carbon steel after electrolytic plasma treatment, *Materials Testing*, 2021, vol. 63, p. 842. <https://doi.org/10.1515/mt-2020-0119>
3. Chongyang, N., Tianlin, Z., Yue, X., Lixia, Y., et al., Study on preparation and friction characteristics of steel 1045 modified layer based on plasma electrolytic carbonitriding, *Mater. Today Commun.*, 2022, vol. 33, art. ID 104518. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104518>
4. Sheng, Y., Zhang, Z. and Li, W., Effects of pulse frequency and duty cycle on the plasma discharge characteristics and surface microstructure of carbon

- steel by plasma electrolytic nitrocarburizing, *Surf. Coat. Technol.*, 2017, vol. 330, p. 113.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.09.031>
5. Pérez, H., Vargas, G., Magdaleno, C. and Silva, R., Oxy-nitriding AISI 304 stainless steel by plasma electrolytic surface saturation to increase wear resistance, *Metals*, 2023, vol. 13, art. ID 309.
<https://doi.org/10.3390/met13020309>
 6. Pohrel'yuk, I.M., Tkachuk, O.V., Proskurnyak, R.V., Kuznetsov, O.V., et al., Morphology and corrosion properties of hydroxyapatite coating on VT6 titanium alloy, *Mater. Sci.*, 2023, vol. 58, p. 781.
<https://doi.org/10.1007/s11003-023-00730-1>
 7. Belkin, P.N. and Kusmanov, S.A., Plasma electrolytic boriding of steels and titanium alloys, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2019, vol. 55, no. 1, p. 1.
<https://doi.org/10.3103/S106837551901006X>
 8. Mukhacheva, T.L., Belkin, P.N., Dyakov, I.G. and Kusmanov, S.A., Wear mechanism of medium carbon steel after its plasma electrolytic nitrocarburizing, *Wear*, 2020, vols. 462–463, art. ID 203516.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203516>
 9. Kusmanov, S.A., Tambovskii, I.V., Korableva, S.S., Silkin, S.A., et al., Increase in hardness and corrosion resistance of a medium-carbon steel surface using cathodic plasma electrolytic nitriding, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2022, vol. 58, p. 323.
<https://doi.org/10.3103/S106837552204010X>
 10. Parfenov, E.V., Farrakhov, R.G., Mukaev, V.R., Gusarov, A.V., et al., Electric field effect on surface layer removal during electrolytic plasma polishing, *Surf. Coat. Technol.*, 2016, v. 307, p. 1329.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.08.066>
 11. Witzke, K., Kensbock, R., Willsch, C.U., Fricke, K., et al., Mechanical and plasma electrolytic polishing of dental alloys, *Materials*, 2023, vol. 16, art. ID 6222.
<https://doi.org/10.3390/ma16186222>
 12. Xiang, Y., Sun, H., Yang, D., Ji, G., et al., Material removal model for describing the plasma discharge effect in magnetic-electrolytic plasma polishing, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2023, vol. 131, p. 5023.
<https://doi.org/10.1007/s00170-024-13328-x>
 13. Kusmanov, S.A., Tambovskiy, I.V., Korableva, S.S., Dyakov, I.G., et al., Enhancement of wear and corrosion resistance in medium carbon steel by plasma electrolytic nitriding and polishing, *J. Mat. Eng. Perform.*, 2019, vol. 28, no. 9, p. 5425.
<https://doi.org/10.1007/s11665-019-04342-2>
 14. Yang, D., Sun, H., Wang, J., Ji, G., et al., The formation and stripping mechanism of oxide film on Ti6Al4V alloy surface during electrolytic plasma polishing, *Surf. Coat. Technol.*, 2024, vol. 478, art. ID 130469.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130469>
 15. Apelfeld, A., Borisov, A., Dyakov, I., Grigoriev, S., et al., Enhancement of medium-carbon steel corrosion and wear resistance by plasma electrolytic nitriding and polishing, *Metals*, 2021, vol. 11, art. ID 1599.
<https://doi.org/10.3390/met11101599>
 16. An, S., Hansen, L., Wolff, T., Foest, R., et al., Energetic characterization during plasma electrolytic polishing of cemented tungsten carbide, *J. Appl. Phys.*, 2023, vol. 134, art. ID 033305.
<https://doi.org/10.1063/5.0155581>
 17. Apelfeld, A., Grigoriev, S., Krit, B., Ludin, V., et al., Improving the stability of the coating properties for group plasma electrolytic oxidation, *Manuf. Lett.*, 2022, vol. 33, p. 54.
<https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2022.08.005>
 18. Kuroda, P.A.B., Cardoso, G.C., Rossi, M.C., Afonso, C.R.M., et al., Analyzing PEO anodization time to monitor coatings phases, composition, morphology, thickness, and microhardness during the growth of TiO₂ pores on the CP-Ti surface, *Mater. Lett.*, 2024, vol. 363, art. ID 136226.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.136226>
 19. Grigoriev, S., Peretyagin, N., Apelfeld, A., Smirnov, A., et al., Investigation of tribological characteristics of PEO coatings formed on Ti6Al4V titanium alloy in electrolytes with graphene oxide additives, *Materials*, 2023, vol. 16, art. ID 3928.
<https://doi.org/10.3390/ma16113928>
 20. Valizade, N., Sabour Rouh Aghdam, A., Jarjoura, G., Corrosion and biological study on biofunctionalized porous coating on titanium produced by plasma electrolytic oxidation, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 2024, vol. 688, art. ID 133567.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133567>
 21. Grigoriev, S.N., Kondratsky, I.O., Krit, B.L., Ludin, V.B., et al., Protective and thermophysical characteristics of plasma-electrolytic coatings on the ultralight magnesium alloy, *J. Eng. Mater. Technol.*, 2022, vol. 144, art. ID 021006.
<https://doi.org/10.1115/1.4052718>
 22. Lashkarara, S., Fazlali, A., Ghaseminezhad, K., Fleck, C., et al., Mechanism of plasma electrolytic oxidation in Mg₃ZnCa implants: a study of double-layer formation and properties through nanoindentation, *Sci. Rep.*, 2024, vol. 14, art. ID 7380.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-58008-8>
 23. Hoseini, A. and Yarmand, B., Photoelectrocatalytic and photocorrosion behavior of MoS₂- and rGO-containing TiO₂ bilayer photocatalyst immobilized by plasma electrolytic oxidation, *J. Alloys Compd.*, 2024, vol. 984, art. ID 173976.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.173976>
 24. Grigoriev, S., Peretyagin, N., Apelfeld, A., Smirnov, A., et al., Investigation of the characteristics of MAO coatings formed on Ti6Al4V titanium alloy in electrolytes with graphene oxide additives, *J. Compos. Sci.*, 2023, vol. 7, art. ID 142.
<https://doi.org/10.3390/jcs7040142>
 25. Шаталов, В.К., Штокал, А.О., Блатов, А.А., Микродуговое окисление поверхностей

- изделий вне ванны, *Машиностроение и компьютерные технологии*, 2015, № 3, с. 1.
<https://doi.org/10.7463/0315.0760651>
26. Попов, А.И., Попова, А.И., Попова, Д.А., Технологические аспекты струйной электролитно-плазменной обработки, *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*, 2019, т. 25, № 4, с. 54.
<https://doi.org/10.18721/JEST.25405>
 27. Popov, A.I., Novikov, V.I. and Radkevich, M.M., Characteristics of the development of electric discharge between the jet electrolyte cathode and the metal anode at atmospheric pressure, *High Temper.*, 2019, vol. 57, no. 4, p. 483.
 28. Popov, A.I., Popova, A.I., Zakharov, S.V., Novoselov, M.V., et al., Processes of contact interaction of an electrolyte plasma jet with a surface, *Adv. Mech. Eng.*, 2022, p. 176.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-91553-7_19
 29. Руднев, В.С., Недозоров, П.М., Яровая, Т.П., Мансуров, Ю.Н., Локальное плазменно-электрохимическое оксидирование на примере сплава АМг5, *Цветные металлы*, 2017, № 1, с. 59.
<https://doi.org/10.17580/tsm.2017.01.10>
 30. Мустафин, Т.Б., Гайсин, А.Ф., Многоканальный разряд между струйным электролитическим анодом и твердотельным катодом, *ТВТ*, 2011, т. 49, № 4, с. 634.
 31. Скаков, М.К., Сапатаев, Е.Е., Локальное модифицирование поверхности деталей из конструкционных сталей, *Вестник КазНТУ*, 2017, № 1, с. 341.
 32. Ушомирская, Л.А., Герасимов, А.С., Технологические возможности применения струйного течения электролита при электролитно-плазменном полировании, *Металлообработка*, 2015, № 4(88), с. 25.
 33. Ушомирская, Л.А., Новиков, В.И., Полирование легированных сталей в нетоксичных электролитах при высоком напряжении, *Металлообработка*, 2008, № 1(43), с. 22.
 34. Yerokhin, A., Pilkington, A., Matthews A., Pulse current plasma assisted electrolytic cleaning of AISI 4340 steel, *J. Mater. Process. Technol.*, 2010, vol. 210, p. 54.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.08.018>
 35. Куликов, И.С., Ващенко, С.В., Каменев, А.Я., *Электролитно-плазменная обработка материалов*. Минск: Беларус. навука, 2010. 232 с.
<https://avidreaders.ru/book/elektrolitno-plazmennaya-obrabotka-materialov.html>
 36. Попов, А.И., Атомно-дислокационная модель удаления поверхностных слоев струйным электролитно-плазменным полированием, *Воронежский научно-технический вестник*, 2024, № 1(47), с. 31.
<https://doi.org/10.34220/2311-8873-2024-31-51>
 37. Журавлев, А.В., Чекалова, Е.А., Овчинников, В.В., Исследование механических свойств дискретного оксидного слоя на инструментальном материале, *Вестник современных технологий*, 2023, № 1(29), с. 38.
 38. Grigoriev, S.N., Tambovskiy, I.V., Mukhacheva, T.L., Kusmanova I.A., et al., Influence of electrophysical characteristics of plasma electrolytic treatment of 16MnCr5 structural alloy steel on structural and phase changes in the surface and its tribological properties, *Surf. Coat. Technol.*, 2024, vol. 493, art. ID 131304.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131304>
 39. Belkin, P.N., Borisov, A.M., Kusmanov, S.A, Plasma electrolytic saturation of titanium and its alloys with light elements, *J. Surf. Investig. X-ray Synchr. Neutron Tech.*, 2016, vol. 10, p. 516.
<https://doi.org/10.1134/S1027451016030058>
 40. Kusmanov, S.A., Kusmanova, Yu.V., Naumov, A.R., Belkin, P.N., Formation of diffusion layers by anode plasma electrolytic nitrocarburizing of low-carbon steel, *J. Mat. Eng. Perform.*, 2015, vol. 24, no 8, p. 3187.
<https://doi.org/10.1007/s11665-015-1578-y>

Summary

The article considers the features of the local plasma electrolytic treatment by the jet feed of an electrolyte onto the side surface of a rotating cylinder made of low-carbon steel. The influence of hydrodynamic parameters of the treatment and voltage on the electro- and thermophysical characteristics of the process was studied. The optimum values of the electrolyte flow rate, the nozzle diameter and the distance between the sprayer and the treated surface were established which meet the developed conditions for the efficiency of the local plasma electrolytic treatment. Volt-ampere and volt-temperature characteristics of the process were obtained which have common patterns with the treatment by the immersion method when the operating voltage range is shifted towards higher values. A technique for determining the heat flux into a metal sample during the local treatment with an electrolyte jet was developed based on temperature measurements performed outside the heated area, using which the features of the heat exchange in the electrolyte – vapor-gas layer – rotating cylinder-electrode system were studied.

Keywords: plasma electrolytic treatment, local treatment, jet treatment, heating, low-carbon steel, model, heat flows