

Особенности теплообмена при анодной электролитно-плазменной обработке цилиндрических деталей

И. Г. Дьяков, В. С. Белкин, С. Ю. Шадрин, П. Н. Белкин

Костромской государственной университет им. Н.А. Некрасова,
ул. 1 Мая, 14, г. Кострома, 156961, Россия, e-mail: belkinp@yandex.ru

Рассматривается теплообмен в трехфазной электрохимической системе: металлический анод – парогазовая оболочка – раствор электролита. Цель исследования – определение влияния длины обрабатываемого участка цилиндрической детали на распределение характеристик нагрева по ее поверхности. Установлено, что увеличение длины участка детали, контактирующего с электролитом, приводит к уменьшению средней плотности тока, снижению вертикального градиента плотности тока и убыванию плотности теплового потока из оболочки в цилиндрический образец. Предложена модель расчета стационарной температуры цилиндрического изделия и силы тока с учетом конвективного отвода тепла из выступающего над электролитом участка детали в окружающую среду. Обосновано влияние обтекания изделия электролитом на его температуру и среднюю плотность тока в системе, объясняемое изменением толщины парогазовой оболочки.

Ключевые слова: электролитная плазма, распределение температуры, плотности тепловых потоков.

УДК 621.785.53; 621.3.035.183

ВВЕДЕНИЕ

Электролитно-плазменная обработка (ЭПО) металлов и сплавов реализуется в электрохимической системе при напряжениях, обеспечивающих локальное вскипание электролита у одного из электродов с образованием парогазовой оболочки (ПГО). Погруженная в электролит деталь, являющаяся одним из электродов, может подвергаться термической или химико-термической обработке, очистке поверхности или нанесению различных покрытий. Показана возможность образования наноразмерных зерен карбида алюминия [1], нанокристаллических структур при нитроцементации нержавеющей стали [2, 3], нанокристаллических боридов титана [4] и др. Разработаны режимы скоростных процессов цементации, нитроцементации и азотирования некоторых сталей [5–9].

Большинство публикаций по ЭПО посвящено вопросам материаловедения: фазовому составу, получаемым структурам и их эксплуатационным свойствам. В меньшей степени изучается механизм самого явления, в частности влияния режимных параметров на температуру и скорость нагрева, относящихся к важнейшим факторам любой обработки. Критическое напряжение, определяющее прекращение обычного электролиза и наступление режима периодических прерываний тока, связывают с образованием оболочки из-за вскипания электролита [10] или с возникновением разрядов того или иного типа без выявления причинно-следственных связей

событий [11]. Более сложная картина с образованием полупроводника-оксида наблюдается при обработке вольфрама в слабощелочных растворах за пределами обычного электролиза [12]. Другой переход от прерываний тока к устойчивому нагреву изделия до температур в сотни градусов объясняют появлением полноценных разрядов типа тлеющего с возбуждением и ионизацией атомов парогазовой среды [13] или кризисом кипения, связывая второе критическое напряжение с величиной мощности, вводимой в систему [12, 14].

Характеристику типа кипения, на наш взгляд, следует уточнить. Пузырьковое кипение имеет место на теплоотдающей поверхности, разогреваемой сторонним источником энергии, который способен обеспечить достаточный поток тепла в жидкость. В рассматриваемой системе такого источника нет. Энергия проходящего тока будет выделяться в элементе с максимальным электрическим сопротивлением, то есть в ПГО. По имеющимся оценкам, удельная электропроводность ПГО, образующейся, например, в 10% водном растворе нитрата аммония, составляет $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ [10], что на порядки ниже электропроводности раствора. Именно оболочка является первичным источником тепла, нагревающим как электрод, так и электролит. Поэтому пороговой величиной, соответствующей появлению сплошной и устойчивой ПГО, следует считать плотность теплового потока из оболочки в электролит, равную плотности второго критиче-

ского потока, описывающего обратный переход от пленочного кипения к пузырьковому [15].

Отметим экспериментальные измерения баланса тепла при нагревании вольфрамового образца-катода в водном растворе карбоната калия [16], на базе которых сделан нестандартный вывод о превышении тепла, выделяемого при прохождении электрического тока через электрохимическую систему, над затраченной энергией. Появление избыточной энергии не подтверждается оценками теплового эффекта возможных реакций окисления вольфрама. Поэтому авторы предполагают наличие новой, ещё не изученной реакции. Пока эта гипотеза не получила развития.

Известна также теоретическая оценка баланса тепла в стационарной ПГО на основе принципа наименьшего рассеяния энергии [17]. Определены доли тепла, расходуемого на испарение и нагревание электролита в пренебрежении отводом энергии в электрод с малой площадью поверхности. Получены теоретические оценки температуры пара (1485 К) и толщины ПГО (35 мкм) при напряжении 150 В, близкие к известным экспериментальным данным или численным оценкам.

Теплофизическое состояние ЭПО можно считать аналогом пленочного кипения в недогретой жидкости. Общими признаками являются: устойчивая поверхность раздела жидкость–пар и наличие минимальной плотности теплового потока в жидкость, обеспечивающего устойчивость указанной границы. Существенным отличием оказывается действие внутренних источников тепла в ПГО, связанных с прохождением через нее электрического тока.

В данной работе будут рассмотрены закономерности теплообмена в условиях анодной ЭПО, которая имеет ряд практических преимуществ [18]. Электрические разряды при катодном процессе дают возможность получать перспективные структуры на поверхности образцов благодаря локальному импульсному воздействию, не нагревая весь объем материала [19]. С другой стороны, катодная обработка сопровождается увеличением шероховатости поверхности и ростом коэффициента трения при скольжении по контртелу [9]. Кроме того, имеется опасность перегрева изделия и даже оплавления. Наоборот, анодный вариант ведёт к уменьшению шероховатости за счет анодного растворения [20] при отсутствии заметных электрических разрядов. В интервале напряжений 200–270 В ток через анодную ПГО переносят главным образом анионы электролита, эмитируемые из раствора, кипящего в электрическом поле [21, 22]. Этот механизм подтверждается существенным влиянием

анионного состава электролита на процессы растворения и окисления детали-анода [10], а также отсутствием линий возбужденных атомов в спектре [23]. Теоретический анализ процессов в ПГО показал, что эмиссия анионов может быть связана не только с зарядовой неустойчивостью поверхности типа Тонкса–Френкеля, но и с колебательной неустойчивостью типа Кельвина–Гельмгольца при движении пара в ПГО [24].

Цель предлагаемой работы – изучение влияния геометрических условий анодной ЭПО, в частности длины обрабатываемого участка цилиндрической детали на распределение характеристик нагрева по ее поверхности: плотности тока, температуры и плотности теплового потока из ПГО в образец. Плотность теплового потока из ПГО в образец уже определялась различными методами, но их результаты оказались противоречивыми. Коэффициент теплоотдачи между цилиндрическим образцом и ПГО оценивался методом регулярного режима первого рода и оказался равным $1400 \pm 200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [25]. Расчет того же коэффициента теплоотдачи в нестационарных условиях при торцевом нагреве цилиндрического образца решением обратной задачи теплопроводности по экспериментальному распределению температуры в образце привел к значению $2500 \pm 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [26]. Далее было показано, что наблюдаемые различия экспериментальных данных связаны с условностью измеряемой величины [27]. При ЭПО нет явно выраженной теплоотдающей поверхности, за нее принимают математическую поверхность максимальной температуры в ПГО, профиль которой связан с неоднородным выделением энергии по высоте вертикально погруженной обрабатываемой детали. Сделан вывод о нецелесообразности описания теплообмена с помощью коэффициента теплоотдачи в условиях ЭПО. Впоследствии была разработана методика определения плотности теплового потока из оболочки в анод методом шаговой регуляризации по данным экспериментального измерения распределения температуры [28, 29], применяемая в этой работе.

Класс деталей, упрочняемых ЭПО, часто ограничивается возможностью их равномерного нагрева, поэтому изучение распределения температуры, плотности тока и плотности тепловых потоков по поверхности модифицируемого изделия имеет важный технологический аспект. Практически уменьшить вертикальный градиент температуры для достижения более равномерного распределения поверхностной твердости или иных свойств можно изменением гидродинамических условий обработки в рабочей камере. Для этого применяются различные конструкции камер с радиальными потоками электролита, его

вращением или продольным обтеканием изделия [30]. В данной работе будет использована схема продольного обтекания образца охлаждаемым электролитом с фиксацией величины его расхода.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Температуру нагреваемого образца и силу тока в системе можно определить решением уравнения теплопроводности в ПГО, а также получить вольт-амперные (ВАХ) и вольт-температурные (ВТХ) характеристики ЭПО [15]. В качестве первого приближения рассмотрим простую модель нагревания относительно короткого образца без учета неравномерного по вертикали выделения энергии. Задача решается при следующих допущениях. Выделение тепла за счет прохождения тока через электролит и образец не учитывается. Тепло в ПГО по ее горизонтальному сечению выделяется равномерно, поскольку толщина ПГО на два-три порядка превышает длину свободного пробега заряженных частиц в среде при атмосферном давлении. Перенос тепла в оболочке осуществляется теплопроводностью. Ток через оболочку описывается законом Ома. В ПГО могут существовать пространственные заряды [31], но их учет не приводит к изменению вида ВАХ или зависимости толщины ПГО от напряжения [15]. В модели пренебрегается зависимостью теплопроводности пара от его температуры. Также не учитываются гипотетические изменения механизма проводимости ПГО, которыми объясняют уменьшение температуры при росте напряжения выше 260–280 В.

На рис. 1 показана схема теплообмена в прианодной области. Горизонтальная координата x отсчитывается от поверхности образца-анода, δ – средняя по вертикали толщина ПГО, h – длина погруженной части анода. Вертикальная координата z отсчитывается от торца. При выборе граничного условия учтено, что в стационарном состоянии тепло, поступающее в анод из оболочки, проходит через него и полностью рассеивается в атмосферу из участка образца над электролитом. С учетом системы крепления обрабатываемой детали вместе с токоподводом выступающую из электролита часть можно моделировать полубесконечным ребром круглого сечения и использовать известную формулу для конвективного отвода тепла [32]. Тогда плотность потока последнего из ПГО в анод будет определяться следующим образом:

$$q_A = \frac{Q}{2\pi Rh + \pi R^2} = \frac{\pi R(T_A - T_0)\sqrt{2\alpha\lambda_A R}}{2\pi Rh + \pi R^2} = \frac{(T_A - T_0)\sqrt{2\alpha\lambda_A R}}{2h + R}, \quad (1)$$

где Q – поток тепла из выступающей части анода в атмосферу; R – радиус анода; T_A – температура нагреваемого участка анода; T_0 – температура окружающей среды (комнатная); α – коэффициент теплоотдачи от участка образца над электролитом в окружающую атмосферу; λ_A – теплопроводность материала анода. Уравнение теплопроводности в ПГО вместе с граничными условиями имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} &= -w = -\frac{jU}{\delta} = -\frac{\chi U^2}{\delta^2}, \\ T(\delta) &= T_s, \\ \lambda \frac{dT}{dx}(0) &= \frac{\sqrt{2\alpha\lambda_A R}}{2h + R} [T(0) - T_0], \\ -\lambda \frac{dT}{dx}(\delta) &= q_l, \end{aligned} \quad (2)$$

где λ – теплопроводность пара; T – температура парогазовой среды как функция x , w – объемная мощность источников тепла в ПГО; j – средняя плотность тока через оболочку; U – напряжение, χ – удельная электропроводность ПГО; T_s – температура насыщения пара, равная 100°C, $T(0) = T_A$, q_l – плотность теплового потока из ПГО в электролит.

Необходимость третьего граничного условия, где задана плотность потока тепла из ПГО в электролит q_l , связана с зависимостью толщины оболочки от внешних параметров. Здесь используется эмпирическая зависимость

$$q_l = q_0 + (\beta + \gamma v)U, \quad (3)$$

где $q_0 = 0,9$ МВт/м², $\beta = 3$ кА/м², $\gamma = 1,26 \cdot 10^5$ Кл/м³, v – скорость течения электролита [33]. Переход к безразмерным величинам приводит к следующей краевой задаче:

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{T(x) - T_0}{T_s - T_0}; \quad y = \frac{x}{\delta} \\ \frac{d^2 \theta}{dy^2} &= -W, \quad W = \frac{\chi U^2}{\lambda \Delta T}, \\ \theta(1) &= 1, \quad \Delta T = T_s - T_0, \\ \frac{d\theta}{dy}(0) &= E\theta(0), \quad E = \frac{\delta \sqrt{2\alpha\lambda_A R}}{\lambda(2h + R)}, \\ \frac{d\theta}{dy}(1) &= -EF, \quad F = \frac{q_l(2h + R)}{\Delta T \sqrt{2\alpha\lambda_A R}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Физический смысл комплекса W – энергия, выделяемая в ПГО. E соответствует безразмерной толщине ПГО, а F описывает отношение плотности теплового потока из оболочки в электролит к плотности теплового потока в образец-анод. Предлагаемые комплексы могут служить критериями подобия при анализе теплообмена в условиях электролитно-плазменной обработки.

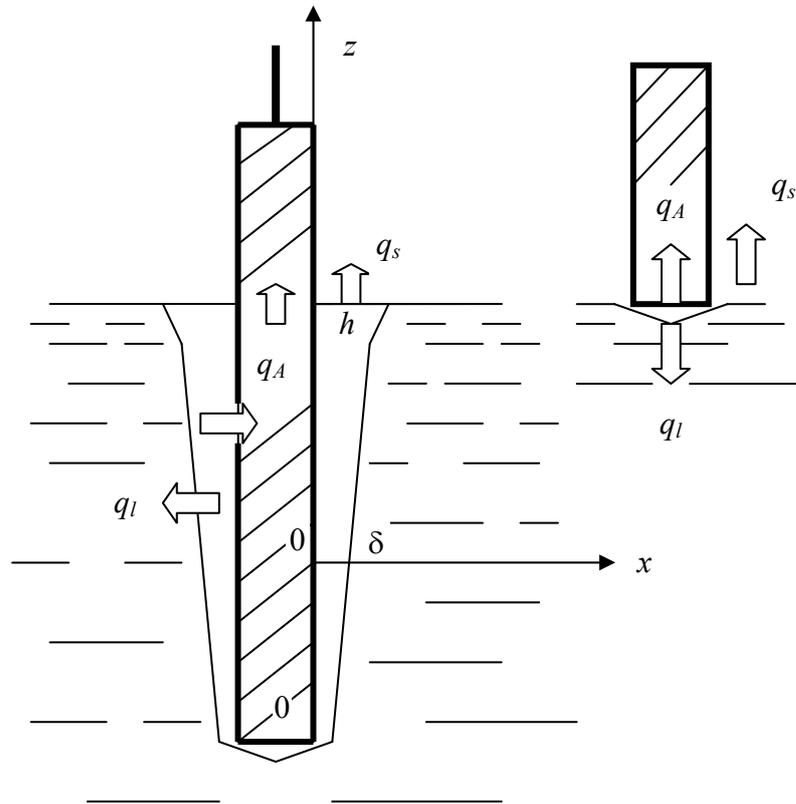


Рис. 1. Схема теплообмена в прианодной области. Обозначения: q_A – плотность теплового потока из оболочки в анод; q_l – плотность теплового потока из оболочки в электролит; q_s – плотность теплового потока из оболочки в атмосферу. Слева – погружение образца на глубину h , справа – торцевой нагрев.

Решение (4) дает параболическую зависимость температуры ПГО от координаты y :

$$\theta(y) = \frac{W+2}{2(E+1)} + \frac{E(W+2)}{2(E+1)}y - \frac{W}{2}y^2. \quad (5)$$

Зависимость толщины ПГО от напряжения находится подстановкой (5) в третье граничное условие (4) и решением получаемого уравнения относительно E :

$$E^2 + \frac{2F-W+2}{2F}E - \frac{W}{F} = 0. \quad (6)$$

Решение уравнения (6) после подстановки натуральных переменных дает зависимость толщины ПГО от напряжения и других параметров процесса:

$$\delta = \frac{\chi U^2}{4q_l} - \frac{\lambda(2h+R)}{2\sqrt{2\alpha\lambda_A R}} - \frac{\lambda\Delta T}{2q_l} + \sqrt{\left[\frac{\chi U^2}{4q_l} - \frac{\lambda(2h+R)}{2\sqrt{2\alpha\lambda_A R}} - \frac{\lambda\Delta T}{2q_l} \right]^2 + \frac{\chi U^2 \lambda(2h+R)}{q_l \sqrt{2\alpha\lambda_A R}}}. \quad (7)$$

Согласно численным оценкам третий член правой части на два порядка меньше второго, что позволяет использовать упрощенное решение:

$$\delta = \frac{\chi U^2}{4q_l} - \frac{\lambda(2h+R)}{2\sqrt{2\alpha\lambda_A R}} + \sqrt{\left[\frac{\chi U^2}{4q_l} - \frac{\lambda(2h+R)}{2\sqrt{2\alpha\lambda_A R}} \right]^2 + \frac{\chi U^2 \lambda(2h+R)}{q_l \sqrt{2\alpha\lambda_A R}}}. \quad (8)$$

Явная зависимость распределения температуры в ПГО от всех параметров процесса получается подстановкой (8) в (5) после перехода к натуральным переменным, откуда находится температура образца $T_A = T(0)$ и ВТХ, то есть $T_A(U)$. Аналогично учет (8) в выражении для плотности тока (2) приводит к ВАХ. Теоретические ВТХ и ВАХ в натуральных переменных оказываются относительно громоздкими, но легко строятся численными методами.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

ЭПО осуществлялась в цилиндрической рабочей камере из нержавеющей стали с внутренним диаметром 100 мм и высотой 210 мм. Циркуляция электролита поддерживалась насосом со скоростями от 1 до 4 л/мин, измеряемыми поплавковым ротаметром РМФ-04 ЖУЗ (точность $\pm 2,5\%$). Электролит в теплообменнике охлаждался водопроводной водой, скорость течения последней определялась измерением ее объема за известный отрезок времени. Теплообменник представлял собой двойной змеевик из нержавеющей стали длиной 9 м (9 витков диаметром 345 мм). Электролит циркулировал через внутреннюю трубку диаметром 14 мм, а охлаждающая вода – через наружную диаметром 26 мм в противоположном направлении. Температура электролита измерялась на входе в рабочую камеру цифровым термометром с термопарой

(точность 3%). Источник питания мощностью 12 кВт обеспечивал постоянное напряжение до 300 В при максимальном токе 40 А. Напряжение определялось вольтметром ЛМ-1 (точность 0,5%). Ток в цепи регистрировался осциллографом Zet 302 и мультиметром MS-6501 (точность $\pm 3\%$). Температура образцов устанавливалась цифровым мультиметром MS-6501 (точность $\pm 3\%$) с термопарой, помещенной в глухое отверстие на оси образца. Спай термопары находился в 3 мм от нижней грани образца, кроме оговоренных случаев.

Цилиндрические образцы из стали 20 диаметром 5–12 мм и длиной 30–100 мм подключались к положительному полюсу источника питания, а рабочая камера – к отрицательному. Перед нагревом образцы очищались наждачной бумагой до осветления и обезжиривались этиловым спиртом. В качестве электролитов использовались растворы хлорида аммония и нитрата аммония с концентрациями 1–3 моль/л в дистиллированной воде. Концентрации растворов контролировались измерением их плотности (точность $\pm 0,001$ г/см³). ЭПО образцов выполнялась следующим образом. На образец подавалось напряжение 180 В, затем он погружался в электролит со скоростью 1,5–2 мм/с. После погружения на заданную глубину величина напряжения изменялась согласно программе исследования. После обработки образцы доставали из электролита, напряжение отключалось после прекращения контакта.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Температура образца-анода

Все ВТХ имеют стандартный вид с максимумом температуры при напряжениях 240–280 В (рис. 2). Такой характер зависимости обнаружен относительно давно и многократно подтвержден различными исследователями [10, 34]. Возможной причиной появления нисходящей ветви ВТХ могут быть процессы ионизации в ПГО с бомбардировкой электролита ионами, что вызовет его разбрызгивание и охлаждение образца-анода каплями электролита [10, 15]. Приведенный выше расчет температуры нагрева качественно соответствует наблюдаемым данным только на восходящей ветви ВТХ, поскольку принятая модель не учитывала возможного изменения механизма проводимости.

Температура образца в его нижней части увеличивается при росте глубины погружения во всех случаях. Увеличение площади контакта образца с ПГО способствует снижению электрического сопротивления системы, росту силы тока и величины энергии, выделяющейся в прианодной

области. В то же время, судя по результатам, в меньшей степени усиливается и отвод тепла в выступающую из электролита часть образца. Этот поток тепла будет пропорционален температуре образца на уровне горизонтальной поверхности электролита. Почти при всех напряжениях температура образца в случае торцевого нагрева (нижняя кривая на рис. 2) заметно ниже, нежели при его погружении в электролит, исключая интервал напряжений 100–120 В. Очевидно, что при торцевом нагреве принципиально изменяются форма ПГО и условия эвакуации пара в атмосферу (рис. 1). К горизонтальному движению пара при торцевом нагреве добавляется вертикальное, стимулированное продольным обтеканием образца электролитом. Увеличение погружения образца от 5 до 10 мм меньше влияет на его температуру, а данные для глубин 15 и 20 мм практически совпадают. Этот факт косвенно указывает на незначительный рост поступления энергии в образец по мере увеличения длины его погружаемой части в данном интервале.

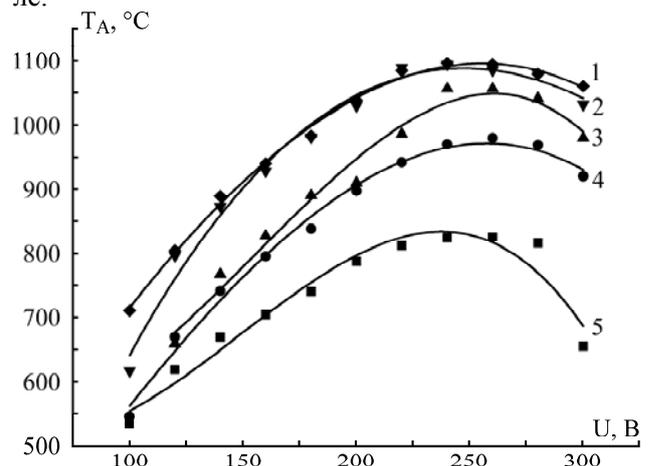


Рис. 2. Зависимость температуры цилиндрического образца-анода от напряжения нагрева в 10% водном растворе хлорида аммония. Длина погруженного в электролит участка образца, мм: 1 – 20; 2 – 15; 3 – 10; 4 – 5; 5 – 0. Продольное обтекание образца электролитом при величине расхода 3 л/мин.

На рис. 3 показана зависимость температуры анода от интенсивности его обтекания (расхода электролита). Выполненный выше теоретический анализ объясняет наблюдаемые зависимости. Усиление обтекания способствует увеличению температуры из-за уменьшения толщины ПГО. Согласно формулам (3) и (8) увеличение скорости течения электролита приведет к росту плотности теплового потока в электролит q_l и уменьшению толщины ПГО. Утонение оболочки понизит ее электрическое сопротивление и увеличит ввод энергии в ПГО. Рост температуры при увеличении расхода электролита сильнее при малых глубинах погружения. Далее пока-

жем, что этот факт связан с неоднородным распределением плотности тока по вертикали.

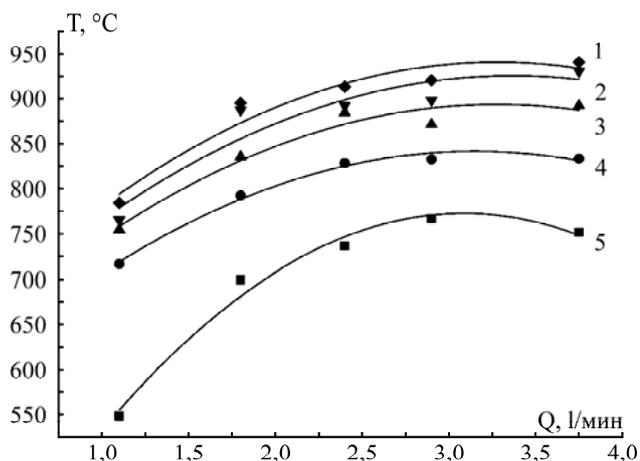


Рис. 3. Зависимость температуры образца-анода от интенсивности его обтекания электролитом. Длина погружённого в электролит участка образца, мм: 1 – 20; 2 – 15; 3 – 10; 4 – 5; 5 – 0. Напряжение нагрева 180 В.

3.2. Плотность тока

Прохождение тока в условиях ЭПО всегда носит пульсирующий характер. Имеется предположение, что импульсы тока связаны с неустойчивостью электрического разряда в условиях катодного азотирования [35], но есть основания считать картину более сложной. Установлено, что импульсы тока связаны с механическими колебаниями ПГО. Такой вывод сделан на основании сходства частот пульсаций тока с частотой звуковых колебаний в электролите рабочей камеры, записанных с помощью микрофона [23]. Частота пульсаций тока в среднем составляет десятки герц, а их амплитуда изменяется от 4 до 15% от среднего значения тока при записи тока механическим самописцем. Однако осциллограммы тока, полученные на современном оборудовании, указывают на гораздо более широкий частотный диапазон. Помимо колебаний ПГО имеются высокочастотные пульсации, которые могут быть связаны с дискретным переносом заряда через ПГО [21]. Отметим, что пульсации оболочки должны существенно увеличивать отвод тепла из ПГО в электролит и, следовательно, способствовать росту соответствующего теплового потока. Этот вопрос выходит за рамки данного исследования, поэтому для описания стационарного теплообмена использовались средние значения тока, показываемые цифровыми приборами.

Все ВАХ ЭПО, как правило, убывающие. Сила тока при увеличении длины погруженной части образца, естественно, возрастает, но средняя плотность тока, формально определяемая делением измеренного тока на площадь контакта с электролитом, уменьшается (рис. 4). Причиной

падающего характера ВАХ является возрастание толщины ПГО при росте напряжения согласно (8). Расчетные значения плотности тока по приведенной выше методике примерно в 3 раза ниже экспериментальных данных, что указывает на ограниченность используемой модели.

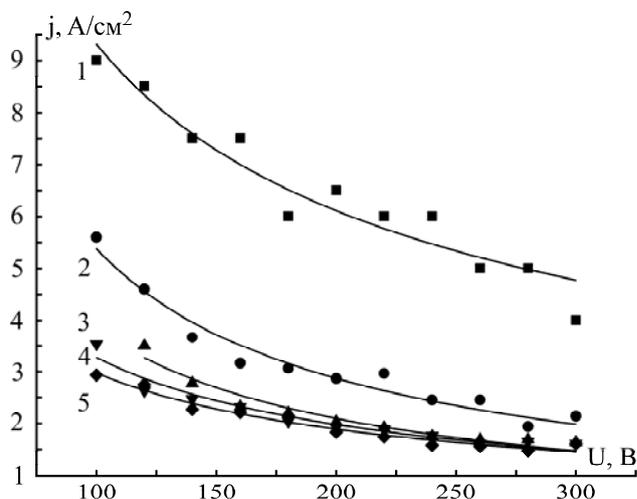


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика нагрева цилиндрического образца диаметром 5 мм в 10% водном растворе хлорида аммония. Длина погружённого в электролит участка образца, мм: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 15; 5 – 20. Продольное обтекание образца электролитом при расходе 3 л/мин.

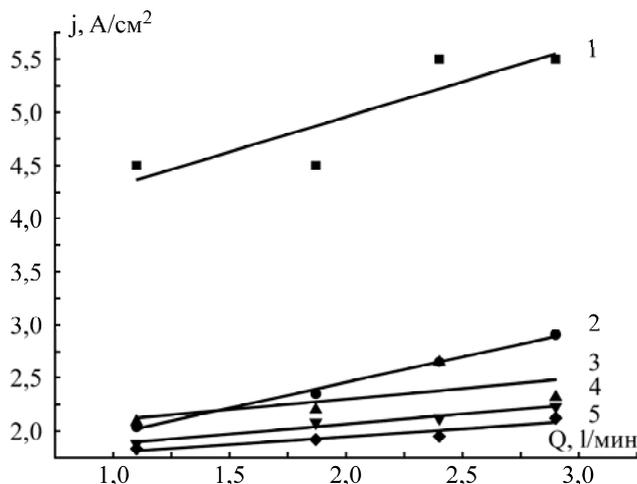


Рис. 5. Влияние интенсивности обтекания образца-анода электролитом на среднюю плотность тока. Длина погружённого в электролит участка образца, мм: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 15; 5 – 20. Напряжение нагрева 180 В.

Увеличение скорости обтекания образца электролитом всегда повышает среднюю плотность тока (рис. 5), что также можно объяснить утонением ПГО и снижением ее электрического сопротивления. Подача охлажденного электролита в зону обработки увеличивает градиент температуры в слое электролита, контактирующего с ПГО, следовательно, повышает тепловой поток из оболочки в электролит. Кроме того, охлаждение электролита в приэлектродной области увеличивает степень его недогрева до температуры насыщения, что приводит к уменьшению толщины ПГО.

3.3. Распределение плотности тока по поверхности образца

Интенсивность продольного обтекания образца электролитом оказывает наибольшее влияние на плотность тока при торцевом нагреве образца (кривая 1 на рис. 5). Здесь наблюдается прирост плотности тока на $1,0 \text{ А/см}^2$ в изученных пределах изменения скорости электролита. Уже при погружении образца на 5 мм прирост плотности тока снижается до $0,87 \text{ А/см}^2$. Эта величина уменьшается до $0,23\text{--}0,35 \text{ А/см}^2$ при дальнейшем увеличении глубины погружения. Однако в интервале глубин погружения 10–20 мм наклон зависимостей на рисунке оказывается практически одинаковым при достигнутой точности эксперимента.

Можно предположить, что обнаруженная тенденция роста средней плотности тока при увеличении скорости обтекания образца электролитом связана с неоднородным распределением тока по поверхности нагреваемой детали, следствием чего является отмеченный выше вертикальный градиент ее температуры. Для оценки неравномерности распределения плотности тока по вертикали предположим, что локальная плотность тока убывает в направлении координаты z по линейному закону. Тогда средняя плотность тока через боковую поверхность цилиндрической детали будет определяться следующим соотношением:

$$j_{lat} = \frac{I_{lat}}{2\pi R h} = \frac{1}{2\pi R h} \int_0^h (j_0 - kz) 2\pi R dz = j_0 - \frac{kh}{2}, \quad (9)$$

где I_{lat} – ток через боковую поверхность образца; R – радиус образца; h – длина его погруженной в электролит части; j_0 – плотность тока в нижней части образца; k – вертикальный градиент плотности тока. Для экспериментальной проверки зависимости (9) предположим, что ток через торцы цилиндра при различных глубинах погружения изменяется незначительно. Вычитание этого тока, измеренного при торцевом нагреве при $h = 0$, из значений тока, полученных при других глубинах погружения, даст величины тока через боковую поверхность цилиндрического образца. Соответствующая зависимость плотности тока j_{lat} , построенная по экспериментальным данным, представлена на рис. 6. Выражение (9) представляет собой убывающую функцию h , что дает обоснование экспериментальной зависимости $j_{lat}(h)$.

Из полученных данных следует, что не только средняя плотность тока через боковую поверхность убывает при увеличении длины нагреваемого участка, но и ее градиент снижается при увеличении напряжения нагрева. Чем больше

напряжение, тем более равномерно распределение тока по поверхности детали. Можно предположить, что увеличение энергии, поступающей в ПГО за счет роста напряжения, способствует выравниванию условий нагрева по поверхности детали. Не исключено, что тот же эффект достигается увеличением площади контакта детали с электролитом при неизменном напряжении. Такой механизм объясняет менее выраженное влияние скорости обтекания детали электролитом на ее температуру при более значительных глубинах погружения, как это следует из рис. 3, или на увеличение плотности тока (рис. 6).

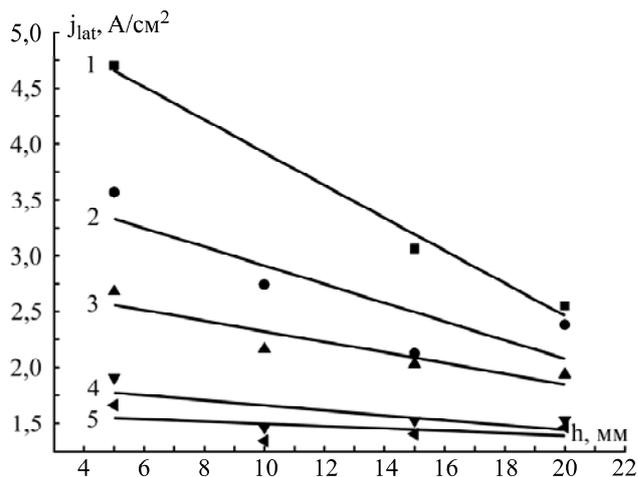


Рис. 6. Зависимость средней плотности тока через боковую поверхность нагреваемой цилиндрической детали от глубины ее погружения в электролит. Напряжение нагрева, В: 1 – 100; 2 – 120; 3 – 140; 4 – 300; 5 – 300. Расход электролита 3 л/мин.

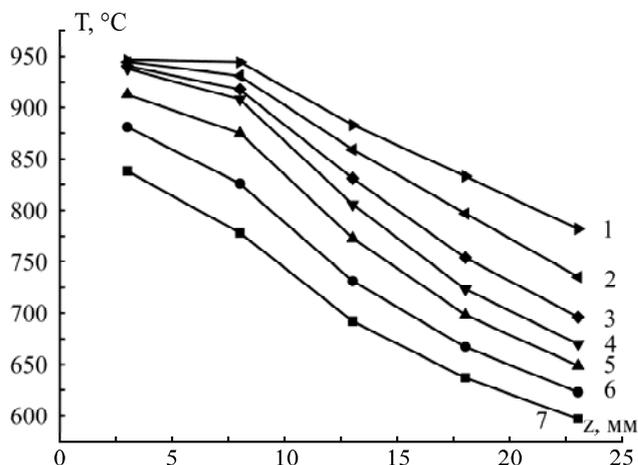


Рис. 7. Зависимость температуры на оси образца диаметром 12 мм от вертикальной координаты, отсчитываемой от его торца вверх по вертикали. Длина погружённого в электролит участка образца, мм: 1 – 30; 2 – 25; 3 – 20; 4 – 15; 5 – 10; 6 – 5; 7 – 0. Расход электролита 3 л/мин, напряжение 260 В.

Неравномерному распределению плотности тока по длине образца соответствует неоднородное распределение температуры по его оси (рис. 7). Здесь совокупное влияние оказывают поступление тепла из ПГО, связанное с величи-

ной локальной плотности тока, и высокая теплопроводность материала, способствующая выравниванию температуры по длине образца. Количественные характеристики распределения температуры соответствуют полученным в условиях продольного, но сосредоточенного обтекания детали электролитом [26].

3.4. Распределение плотности теплового потока по поверхности образца

Вначале рассмотрим тепловой поток из погруженного участка образца в его выступающую из электролита часть, который будет равен потоку тепла из ПГО в образец, с помощью решения обратной задачи стационарной теплопроводности. Будем считать, что через сечение образца на уровне поверхности электролита действует тепловой поток из погруженной части образца плотностью q , а на остальных поверхностях его выступающей части происходит теплообмен с окружающей средой. Распределением температуры по горизонтальному сечению образца можно пренебречь, как показали численные оценки [10]. Для сравнения рассмотрим не только полубесконечное ребро, но и ребро конечной длины L . Соответствующие распределения температуры в образце над поверхностью электролита имеют следующий вид:

$$T'(z) = T_0 + \frac{q}{m\lambda_A} \exp(-mz); \quad T''(z) = T_0 + \frac{q}{m\lambda} \frac{\operatorname{ch}\{m(z-L)\} - k' \operatorname{sh}\{m(z-L)\}}{\operatorname{sh}mL + k' \operatorname{ch}mL},$$

где $m = \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda_A R}}$, $k' = \sqrt{\frac{\alpha R}{2\lambda_A}}$. (10)

Здесь вертикальная координата z отсчитывается от границы между погруженной частью образца и выступающей из электролита, L – длина выступающей части образца. Плотность теплового потока из ПГО в анод определяется аппроксимацией экспериментально полученного вертикального распределения температуры в участке образца над электролитом методом наименьших квадратов (табл. 1).

Из полученных данных следует, что повышение напряжения в изученных пределах увеличивает плотность теплового потока в выступающую из электролита часть образца. Очевидной причиной этого является рост энергии, вводимой в систему. Кроме того, наблюдается существенная зависимость плотности теплового потока от длины выступающего над электролитом участка образца, что говорит о большей адекватности модели конечной длины ребра по сравнению с полубесконечным приближением. Для сравнения этих моделей приводятся характеристики торцевого нагрева образца длиной 40 мм. При замене

образца конечной длины на полубесконечный стержень оценка теплового потока уменьшается на 20% (от 0,63 до 0,508 МВт/м²), другая замена на стержень с изолированным свободным торцом приводит к росту оценки плотности теплового потока на 3%.

Влияние длины погруженного в электролит участка на плотность теплового потока в одинаковую выступающую часть представлено в табл. 2. Оказалось, что тепловой поток из погруженной части в выступающую часть образца и равный ему поток из ПГО в образец не зависят от длины погруженного участка. Средняя плотность теплового потока в выступающую часть q составляет $(0,67 \pm 0,04)$ МВт/м² при напряжении нагрева 260 В и $(0,56 \pm 0,04)$ МВт/м² при 200 В. Из этого следует, что при увеличении глубины погружения цилиндрических образцов рост вводимой в ПГО энергии за счет увеличения поверхности контакта с оболочкой и снижения ее сопротивления практически полностью компенсируется отводом тепла в электролит. В таком случае средняя плотность теплового потока из ПГО в образец q_A , равная отношению потока тепла в выступающую из электролита часть к площади контакта образца с ПГО, будет убывающей функцией длины погруженного участка.

Те же закономерности наблюдаются при обработке образца фиксированной длины 40 мм. В табл. 3 приводятся результаты расчета плотности теплового потока из погруженной части образца в выступающую q и плотность теплового потока из ПГО в образец q_A . Здесь применялся менее точный метод численного дифференцирования экспериментального распределения температуры по всей длине образца (кубических сплайнов) в связи с отсутствием обоснованной модели распределения температуры.

Согласно полученным данным возрастание площади контакта образца с ПГО приводит к увеличению поступающего в него тепла только при небольших глубинах погружения. В нижней части образца толщина ПГО минимальна, а локальная плотность тока и плотность теплового потока q_A – максимальны. В верхней части ПГО ее толщина максимальна, соответственно снижены локальная плотность тока и плотность теплового потока в анод. Всего в ПГО поступает достаточно тепла, чтобы ее температура по всей длине превышала температуру образца.

При увеличении глубины погружения образца наступает состояние, в котором верхние участки ПГО нагреваются не только собственными источниками тепла, но и теплом, поступающим из образца-анода, которое в силу высокой теплопроводности металла легко распространяется из нижних участков образца в верхние. Это озна-

Таблица 1. Плотности теплового потока из оболочки в анод

Модель расчета	L , мм	U , В	q , МВт/м ²
Образец конечной длины с теплообменом на боковой поверхности и на верхнем торце	54	200	0,98
То же	40	200	0,63
То же	40	260	0,68
Образец конечной длины с теплообменом на боковой поверхности и с изолированным свободным торцом	40	200	0,65
Полубесконечный образец	40	200	0,51

Примечание. Торцевой нагрев образца диаметром 12 мм. Электролит – водный раствор 2 моль/л NH_4NO_3 .

Таблица 2. Плотности теплового потока из оболочки в анод

h , мм	L , мм	q , МВт/м ²	q_A , МВт/м ²
0	50	0,6565	0,656
10	50	0,6670	0,154
20	50	0,6602	0,086
30	50	0,6817	0,062
40	50	0,6789	0,047
50	50	0,7057	0,040

Примечание. Диаметр образца 12 мм. Электролит – водный раствор 2 моль/л NH_4NO_3 , напряжение 260 В.

Таблица 3. Характеристики нагрева цилиндрического образца диаметром 12 мм и длиной 40 мм

h , мм	L , мм	U , В	q , МВт/м ²	q_A , МВт/м ²
5	35	200	0,66	0,247
25	15	200	0,48	0,051
30	10	200	0,47	0,043
5	35	260	0,71	0,266
25	15	260	0,56	0,060
30	10	260	0,49	0,044

Примечание. Электролит – водный раствор 2 моль/л NH_4Cl .

чает, что при росте вертикальной координаты z , отсчитываемой от торца образца, локальная плотность теплового потока меняет знак. Имеется численная оценка координаты, где плотность теплового потока меняет знак, для цилиндрического образца длиной 4 см. При значении этой координаты 2,3 см, отсчитываемой от торца образца, плотность теплового потока в анод q_A становится нулевой [25]. Этот результат, полученный для ЭПО в 10% растворе хлорида аммония при 280 В, не противоречит данным, приводимым в данной работе.

По этой же причине тепловой поток поступает в образец-анод только из нижней части ПГО. При увеличении длины погруженного в электролит участка сверхкритической величины суммарный тепловой поток из ПГО в образец перестает увеличиваться. Следовательно, плотность теплового потока q_A при увеличении длины погруженного участка будет снижаться, что и получено экспериментально.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложено теоретическое описание теплообмена при ЭПО, отличающееся от известных моделей учетом рассеивания тепла в окружаю-

щую среду через выступающую из электролита часть образца. Результаты расчета качественно объясняют характер ВАХ и ВТХ (на восходящей ветви), зависимость толщины ПГО от параметров процесса и роль интенсивности обтекания образца электролитом. Кроме того, решение задачи в безразмерных переменных позволило выявить критерии подобия параметров процесса, откуда следует, что условия нагрева цилиндрического образца могут быть описаны двумя комплексами: безразмерной энергией, выделяющейся в оболочке, и отношением плотностей тепловых потоков из оболочки в электролит и в образец-анод.

Обнаружено уменьшение средней плотности тока при увеличении глубины погружения детали в электролит, объясняемое неоднородным распределением тока по поверхности детали. Установлено, что вертикальный градиент плотности тока существенно зависит от приложенного напряжения. Практически важное распределение температуры по длине обрабатываемой детали, зависящее от распределения плотности тока и плотности теплового потока, определяется довольно сложной взаимосвязью многих режимных параметров. Увеличение глубины погружения

цилиндрического образца до 5–10 мм вызывает рост выделения тепла в оболочке; доля тепла, поступающего в анод, не снижается, поэтому его абсолютная величина растёт. При обработке более длинных изделий ПГО нагревает только их нижнюю часть, дополнительное тепло, выделяющееся при увеличении глубины погружения образца, будет поступать в электролит. Распространение тепла вдоль изделия благодаря его собственной высокой теплопроводности способствует выравниванию температуры, а также приводит к оттоку тепла из верхних участков детали в смежные области ПГО. В результате увеличение длины погружаемой детали не влияет на тепловой поток в нее, который определяется длиной выступающей из электролита части и условиями конвективного теплообмена над поверхностью электролита. При этом плотность теплового потока из ПГО в образец будет снижаться при возрастании площади контакта с оболочкой, что и подтверждается результатами измерений.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 7.4120.2011).

ЛИТЕРАТУРА

- Aliofkhazraei M., Morillo C., Miresmaeli R., Rouhaghdam A. Sabour. Carburizing of Low-melting-point Metals by Pulsed Nanocrystalline Plasma Electrolytic Carburizing. *Surf Coat Technol.* 2008, **202**, 5493–5496.
- Taheri P., Dehghanian Ch. A Phenomenological Model of Nanocrystalline Coating Production using Plasma Electrolytic Saturation (PES) Technique. *Trans B: Mech Eng.* 2009, **16**(1), 87–91.
- Aliofkhazraei M., Taheri P., Rouhaghdam A. Sabour, Dehghanian Ch. Systematic Study of Nanocrystalline Plasma Electrolytic Nitrocarburising of 316L Austenitic Stainless Steel for Corrosion Protection. *J Mater Sci Technol.* 2007, **23**, 665–671.
- Aliev M.Kh., Sabour A. Pulsed Nanocrystalline Plasma Electrolytic Boriding as a Novel Method for Corrosion Protection of CP-Ti (Part 1: Different Frequency and Duty Cycle). *Bull Mater Sci.* 2007, **30**(6), 601–605.
- Белкин П.Н., Дьяков И.Г., Жиров А.В., Кусманов С.А., Мухачева Т.Л. Влияние составов рабочих электролитов на характеристики анодной цементации. *Физикохимия поверхности и защита материалов.* 2010, **46**(6), 645–650.
- Белкин П.Н., Крит Б.Л., Дьяков И.Г., Востриков В.Г., Мухачева Т.Л. Анодное насыщение сталей азотом и углеродом в водных растворах электролитов, содержащих карбамид. *МирТМ.* 2010, (1), 32–36.
- Tarakci M., Korkmaz K., Gencer Y., Usta M. Plasma Electrolytic Surface Carburized and Hardening of Pure Iron. *Surf Coat Technol.* 2005, **199**(2–3), 205–212.
- Çavuşlu F., Usta M. Kinetics and Mechanical Study of Plasma Electrolytic Carburizing for Pure Iron. *Appl Surf Sci.* 2011, **257**(9), 4014–4020.
- Nie X., Wang L., Yao Z.C., Zhang L., Cheng F. Sliding Wear Behaviour of Electrolytic Plasma Nitrided Cast Iron and Steel. *Surf Coat Technol.* 2005, **200**(5–6), 1745–1750.
- Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. *Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов.* Том I. М.: Техносфера, 2011. 464 с.
- Yerokhin A.L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Dowe S.J. Plasma Electrolysis for Surface Engineering. *Surf Coat Technol.* 1999, **122**, 73–93.
- Савотин И.В., Де Сильва А.К., Давыдов А.Д. Электрохимическое поведение вольфрама в слабощелочных растворах при высоких напряжениях. *Электрохимия.* 1999, **35**(9), 1090–1096.
- Sengupta S.K., Singh O.P. Contact Glow Discharge Electrolysis: a Study of its Onset and Location. *J Electroanal Chem.* 1991, **301**, 189–197.
- Словецкий Д.И., Терентьев С.Д. Параметры электрического разряда в электролитах и физико-химические процессы в электролитной плазме. *Химия высоких энергий.* 2003, **37**(5), 355–361.
- Shadrin S.Yu., Belkin P.N. Analysis of Models for Calculation of Temperature of Anode Plasma Electrolytic Heating. *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2012, **55**, 179–186.
- Mizuno T., Ohmori T., Akimoto T., Takahashi A. Production of Heat During Plasma Electrolysis in Liquid. *Jpn J Appl Phys.* 2000, **39**, 6055–6061.
- Григорьев А.И. О переносе энергии и формировании электрического тока в окрестности опущенного в электролит, сильно нагретого протекающим током электрода. *ЖТФ.* 2004, **74**(5), 38–43.
- Belkin P., Naumov A., Shadrin S., Dyakov I., Zhiron A., Kusmanov S., Mukhacheva T. Anodic Plasma Electrolytic Saturation of Steels by Carbon and Nitrogen. *Advanced Materials Research.* 2013, **704**, 37–42.
- Shen D.J., Wang Y.L., Nash P., Xing G.Z. A Novel Method of Surface Modification for Steel by Plasma Electrolysis Carbonitriding. *Mater Sci Eng. A.* 2007, **458**, 240–243.
- Zhiron A.V., Komarov A.O., Danilov V.V., Shorokhov S.A. Effect of Glycerine Concentration on Dissolution and Oxidation of Mild Steel During Anodic Cementation. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2012, **48**(3), 289–291.
- Белкин П.Н., Ганчар В.И., Петров Ю.Н. Исследование проводимости паровой пленки при анодном электролитном нагреве. *ДАН СССР,* 1986, **291**(5), 1116–1119.
- Belkin P.N., Ganchar V.I., Davydov A.D., Dikumar A.I., Pasinkovskii E.A. Anodic Heating in Aqueous

- Solutions of Electrolytes and its Use for Treating Metal Surfaces. *Surf Eng Appl Electrochem.* 1997, (2), 1–15.
23. Garbarz-Olivier J., Guilpin C. Etude des Discharges Electriques Produites Entre L'electrode et la Solution Lors des Effects D'anode et de Cathode Dans Les Electrolytes Aqueux. *J Chim phys.* 1975, **72**(2), 207–214.
 24. Ширяева С.О., Григорьев А.И., Морозов В.В. О некоторых особенностях появления ионов вблизи заряженной поверхности интенсивно испаряющегося электролита. *ЖТФ.* 2003, **73**(7), 21–27.
 25. Белкин П.Н., Ганчар В.И., Товарков А.К. Теплообмен между анодом и парогазовой оболочкой при электролитном нагреве. *ИФЖ.* 1986, **51**(1), 154–155.
 26. Ганчар В.И. Параметры теплообмена в процессе анодного электролитного нагрева. *ИФЖ.* 1991, **60**(1), 92–95.
 27. Белкин П.Н., Мухачева Т.Л., Дьяков И.Г. Особенности распределения тепловых потоков в системе анод – парогазовая оболочка при анодном электролитном нагреве. *ИФЖ.* 2008, **71**(6), 1027–1033.
 28. Шадрин С.Ю., Жиров А.В., Смирнова Т.С. Восстановление нестационарного граничного условия на нагреваемой поверхности при анодном нагреве. *Вестник Костромского государственного университета.* 2012, (5), 22–25.
 29. Zhiron A.V., Shadrin S.Yu. Determination of Heat Flux from Vapor-gas Envelope into Short Anode Heated by Plasma Electrolysis. *6th International Conference on Material Science and Condensed Matter Physics. Abstracts.* Chisinau, 2012. 279.
 30. Komarov A.O., Mukhacheva T.L., Dyakov I.G., Belkin P.N. Influence of Hydrodynamical Peculiarities of Electrolyte Flows on Temperature of Cylindrical Workpiece by Plasma Electrolysis. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2012, **48**(2), 141–147.
 31. Ганчар В.И., Дмитриев Э.Г. Вольт-амперные и вольт-температурные характеристики анодного электролитного нагрева. *ЭОМ.* 1989, (2), 23–25.
 32. Луканин В.Н., Шатров М.Г., Камфер Г.М. и др. *Теплотехника.* Учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 1999. С. 413.
 33. Белкин П.Н., Товарков А.К. Тепловые потоки при нагреве анода в водных растворах. *Вестник КГУ им. Н.А. Некрасова.* 2001, (3), 8–12.
 34. Лазаренко Б.Р., Дураджи В.Н., Факторович А.А., Брянцев И.В. Об особенностях электролитного нагрева при анодном процессе. *ЭОМ.* 1974, (3), 37–40.
 35. Roy A., Tewari R.K., Sharma R.C., Sherhar R. Feasibility Study of Aqueous Electrolyte Plasma Nitriding. *Surface Eng.* 2007, **23**(4), 243–246.

Поступила 09.07.13

После доработки 24.09.13

Summary

Heat transfer in a three-phase electrochemical system consisting of a metal cylindrical anode (sample part), a vapor-gas envelope and an electrolyte solution is considered. The purpose of the study is to determine the effect of the length of the sample part, contacted with the electrolyte, on the distribution of heating characteristics on its surface. It is established that the increase of the length of the part of the anode submerged in the electrolyte causes the decreasing of the average current density, reduction of the vertical current density gradient, and the decrease of the heat flux per unit area from the envelope to the sample. A model is proposed so as to calculate the stationary cylindrical anode temperature and the current in the system, with the removal of the convective heat flux from the anode portion protruded above the electrolyte into the atmosphere. The influence of the electrolyte flow along the sample on its temperature and the average current density in the system is determined and accounted for by the variations of the vapor-gas envelope thickness.

Keywords: plasma electrolytic deposition, temperature distribution, heat fluxes per unit area.