

Н.Е. ҚАДЫРБОЛАТ, студент гр. ТЭ-201(НАО «Шәкәрім университет»)

Р.К. КУСАИНОВ, руководитель ИЦ "Упрочняющие технологии
и покрытия" (НАО «Шәкәрім университет»)

А.Қ. ҚАНАФАТ, студент гр. ГЗС-22-04 (НАО «Евразийский национальный
университет имени Л.Н. Гумилева»)

Ж.К. АЛДАЖУМАНОВ, старший преподаватель
(НАО «Университет Шакарима»)

А.Б. ЛЕОНИДОВА, докторант гр. ДТФ-2401.1
(НАО «Шәкәрім университет»)

Научный руководитель Р.Х. КУРМАНГАЛИЕВ, докторант гр. ДТФ-301.1
(НАО «Шәкәрім университет»)
г. Семей

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ ПАРОГАЗОВОЙ
ОБОЛОЧКИ И ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА КАТОДНОГО НАГРЕВА
НА ТОЛЩИНЫ ПАРОГАЗОВОЙ ОБОЛОЧКИ**

Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность электролитно-плазменных и катодно-электролитно-плазменных процессов, является формирование устойчивой парогазовой оболочки вокруг катода. Толщина этой оболочки напрямую влияет, интенсивность ионизации и, как следствие, на температуру поверхности обрабатываемого образца. При этом точное определение параметров оболочки затруднено вследствие сложного взаимодействия между тепловыми, электрическими и гидродинамическими явлениями, протекающими в околоскатодной зоне. С этой точки зрения была поставлена задача разработать методику расчета толщины парогазовой оболочки, основанную на учете энергетических характеристик процесса катодного нагрева – таких как плотность тока, падение напряжения, удельная мощность и коэффициент теплоотдачи. Предложенный подход позволяет связать наблюдаемые экспериментальные параметры (температуру поверхности, визуальные признаки разряда, токовую нагрузку) с физическими характеристиками оболочки, обеспечивая тем самым количественную оценку условий протекания (химико-термическая обработка) ХТО-процесса. В рамках проведённых исследований была определена зависимость толщины парогазовой оболочки от основных энергетических параметров разряда. Результаты расчетов и экспериментальных наблюдений позволили выявить закономерности изменения толщины оболочки при различных уровнях катодного нагрева и предложить критерии, обеспечивающие её устойчивое формирование. Ниже приведены

полученные данные и их интерпретация, отражающие взаимосвязь между режимами нагрева и структурно-энергетическими характеристиками околоскатодной зоны.

Материалы и методы

Для исследования формирования и расчёта толщины парогазовой оболочки при катодном нагреве использовалась установка электролитно-плазменной обработки с регулируемым источником постоянного тока. В качестве электролита применялся 20%-ный водный раствор карбоната натрия (Na_2CO_3). Напряжение катода изменялось в диапазоне 100–300 В, что обеспечивало реализацию различных режимов нагрева – от пузырькового кипения электролита до образования устойчивой парогазовой оболочки.

В качестве материала для исследований использовались образцы конструкционной стали 20 размером $20 \times 20 \times 10$ мм. Поверхность образцов перед экспериментом шлифовалась абразивной бумагой различной зернистости (от 60 до P2500), затем полировалась алмазной пастой с размером частиц 0,25–0,5 мкм и очищалась этиловым спиртом.

Температура поверхности и параметры нагрева фиксировались с помощью термопар и цифровой измерительной системы. Для определения распределения тока и энергии в прикатодной зоне выполнялось численное моделирование в среде COMSOL Multiphysics 6.2, с использованием модуля Electric Currents. В модели учитывались электрофизические свойства электролита и стали, а также граничные условия: отрицательное постоянное напряжение на катоде и нулевой потенциал на поверхности анода.

Результаты и обсуждение

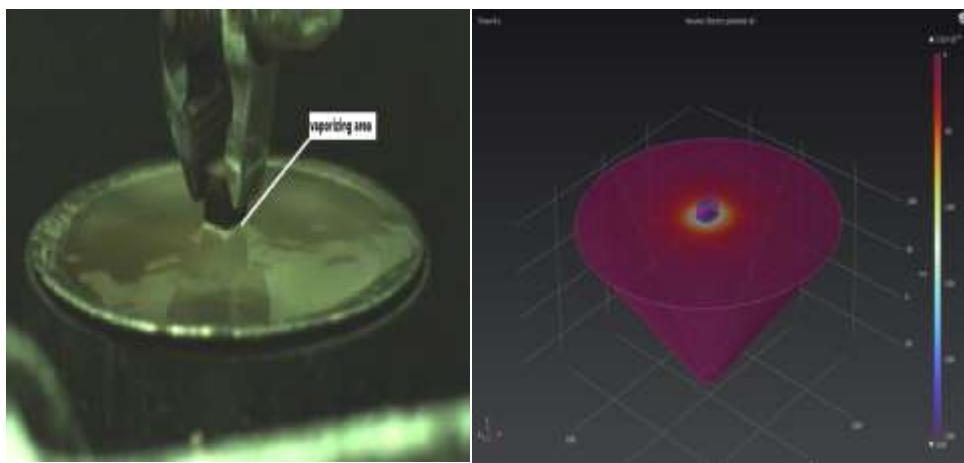


Рис. 1. Область формирования парогазовой оболочки вокруг детали-катода

Если рассматривать процесс электролитно-плазменной обработки с точки зрения зависимости тока от напряжения, то можно выделить три области на графике вольт-амперной характеристики (рисунок 2). В первой

области (фазе) происходит фараадеевский процесс электролиза при котором сила тока достигает пикового значения, затем следует область прерывания тока (фаза II). При достижении некоторого критического значения напряжения V_B начинается активное выделение пузырьков газа у поверхности катода в результате чего среднее значение тока падает. В этой фазе происходит пузырьковое кипение электролита в прикатодной зоне. При дальнейшем возрастании напряжения (фаза III) вокруг детали-катода образуется стабильная парогазовая оболочка в результате слияния пузырьков пара, где достигается пленочное кипение электролита. Это область катодного процесса, при котором происходит нагрев детали с помощью образовавшейся плазмы. Началом этого процесса служит достижение второго критического напряжения V_D .

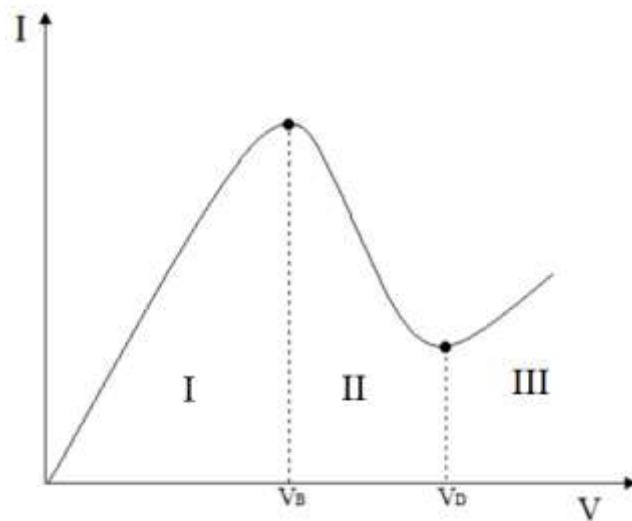


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика катодного нагрева

Образование пузырьков происходит, во-первых, благодаря электролизу раствора электролита, в результате которого выделяются газы и, во-вторых, в результате испарения водной основы электролита [1]. Смешение этих пузырьков и составляют основу парогазовой оболочки в прикатодном пространстве. Для возникновения парогазовой оболочки нужно нагреть прикатодный слой раствора электролита до температуры его кипения.

Парогазовая оболочка (ПГО) представляет собой смесь водяного пара, активированных частиц OH^- , H^+ и ионов, входящих в состав электролита. Основное падение напряжения в электрической цепи происходит именно в этой области, поэтому её свойства во многом определяют нелинейный характер вольт-амперной зависимости процесса электролитно-плазменной обработки (ЭПО). Напряжённость электрического поля в ПГО достигает 10^6 – 10^7 В/м [2]. При температуре около 100 °С такое поле вызывает ионизацию паров, а также эмиссию электронов и ионов, обеспечивающих поддержание стационарного электрического разряда и формирование так называемой электролитной плазмы.

Наиболее распространённым направлением обработки стальных изделий в электролитной плазме является их насыщение лёгкими элементами – азотирование, цементация и борирование. Возможна также многокомпонентная модификация поверхности с одновременным внедрением нескольких элементов (нитроцементация, сульфонитроцементация) либо карбидообразующих элементов, таких как вольфрам, ванадий, молибден, а также их сочетаний. Это значительно расширяет возможности управления структурой и свойствами поверхности. Ранее диффузионное насыщение в условиях электролитной плазмы исследовалось как при анодных, так и при катодных процессах, в основном применительно к сталим и титану (азотирование, нитроцементация). Следует отметить, что физико-химические процессы, протекающие в электролитной плазме, во многом аналогичны процессам, характерным для других видов электрохимико-термической обработки (ЭХТО).

Пропускание электрического тока через электролитическую ячейку, содержащую два металлических электрода – активный и вспомогательный, при постепенном увеличении приложенного напряжения приводит к последовательной смене режимов протекания процесса [3, 4]. Активный электрод, обладающий значительно меньшей площадью поверхности, играет ключевую роль в формировании прикатодных явлений.

Возникновение устойчивой сплошной парогазовой оболочки (ПГО) вокруг активного электрода является необходимым условием для реализации режима электролитно-плазменного нагрева металлов. Поскольку в этом режиме электрохимические процессы практически не влияют на установление теплового баланса, все явления, происходящие на границе металл–электролит, имеют чисто тепловую природу. Благодаря этому нагрев активного электрода может быть интерпретирован как тепловой процесс, аналогичный кипению в классической теплофизике.

Известно, что при увеличении плотности теплового потока от нагревателя к жидкости режим конвективного теплообмена переходит в режим пузырькового кипения. В этом случае на поверхности нагревателя происходит интенсивное парообразование электролита. При критическом тепловом потоке образуется сплошной паровой слой, из-за которого устанавливается плёночное кипение.

На основании анализа экспериментальных данных и литературных источников [5-7] приэлектродную область активного электрода можно представить в виде многослойной структуры. Слой 6, в зависимости от состава электролита, может быть твёрдым и сплошным либо жидким и пористым. В анодном режиме электролитно-плазменной обработки (ЭПО) этот слой часто содержит оксидные соединения.

Перегретая приэлектродная область 3 отделена от основного объёма электролита изотермической поверхностью. Внутри этой зоны темпера-

тура жидкости превышает температуру кипения, тогда как за пределами изотермы она ниже точки кипения. Следовательно, область 3 представляет собой кипящий граничный слой, в котором происходит интенсивное парообразование. Здесь же наблюдается выделение пузырьков газа вследствие электролиза.

Согласно предложенной модели, электрический ток вблизи активного электрода проходит через многофазную систему. При неплотном жидком поверхностном слое возможны последовательности переходов:

металл → электролит → газ → электролит,

или металл → газ → электролит.

Если же поверхностный слой сплошной и твёрдый (проводящий или полупроводниковый), возможны переходы:

металл → полупроводник → газ → электролит, или

металл → газ → электролит.

В этих случаях характер проводимости изменяется от электронного к электронно-ионному и далее к ионному механизму.

В парогазовой зоне при прохождении электрического тока через электролитическую ячейку тепловая энергия выделяется пропорционально сопротивлению соответствующего участка цепи. Сопротивление металлического электрода и основного слоя электролита значительно ниже сопротивления на границе «металл–электролит», поэтому именно в этой области наблюдается наибольшее тепловыделение. Это приводит к интенсивному пузырьковому кипению электролита у поверхности электрода. Протекающий ток вызывает локальный нагрев и частичное испарение электролита. Для перехода системы в режим устойчивого нагрева необходимо, чтобы пузырьковое кипение перешло в плёночное – это возможно при температуре металлического электрода выше примерно 125 °С. Дальнейшее увеличение выделяемой на границе энергии вызывает динамическую неустойчивость двухфазного кипящего слоя, в результате чего пузырьковое кипение сменяется плёночным. В этом режиме поверхность активного электрода покрывается сплошной парогазовой оболочкой, стабилизирующей процесс разряда.

Очевидно, что сопротивление электродов и жидкого электролита значительно меньше, чем сопротивление парогазовой оболочки. Поэтому можно считать, что основная часть электрической энергии, поступающей от источника питания, расходуется на нагревание и испарение электролита. Энергетический баланс процесса можно выразить уравнением:

$$UIt = m(c\Delta T + \psi + c_v\Delta T_v), \quad (1)$$

где I – сила тока (А); m – масса испарившегося электролита (кг); c – удельная теплоёмкость электролита (Дж/(кг·К)); ΔT – разность между исходной температурой электролита и температурой его кипения (К); ψ – удельная

теплота парообразования (Дж/кг); c_v – удельная теплоёмкость пара при постоянном давлении (Дж/(кг·К)); ΔT_v – разность между температурой кипения и температурой пара (К).

Массу испарившегося электролита можно представить как

$$m = \rho S \delta_0, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкого электролита (кг/м³); S – площадь активной поверхности электрода (м²); δ_0 – толщина слоя жидкости, участвующего в испарении (м).

Толщина образующейся парогазовой оболочки связана с δ_0 следующим соотношением

$$\delta = \delta_0 \frac{\rho}{\rho_v}, \quad (3)$$

где $\rho_v = \frac{\mu P}{RT}$ – плотность водяного пара (кг/м³), определяемая из уравнения состояния идеального газа; μ – средняя молярная масса электролита (кг/моль); P – давление (Па); R – универсальная газовая постоянная (Дж/(моль·К)); T – средняя температура парогазовой оболочки (К), которую можно принять равной полусумме температуры кипения электролита и температуры поверхности катода.

Таким образом, выражение для расчёта толщины парогазовой оболочки имеет вид:

$$\delta = \delta_0 \frac{\rho RT}{\mu P}. \quad (4)$$

Парогазовая смесь, формирующаяся в зоне парогазовой оболочки, поднимается вверх под действием силы Архимеда. При стационарных условиях масса испаряющейся жидкости должна быть равна массе поднимающегося вверх пара. Из анализа схемы видно, что в установившемся режиме скорость движения пара определяется балансом между архимедовой силой и вязким сопротивлением. Для центра оболочки это соотношение можно записать как

$$\rho g \delta S = 2S \eta_v \frac{v}{\delta}, \quad (5)$$

откуда скорость движения пара

$$v = \frac{\rho g \delta^2}{2\eta_v}. \quad (6)$$

Вязкость пара может быть выражена через его молекулярные характеристики [8]:

$$\eta_v = \frac{\lambda \rho_v}{3} \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} = \frac{\lambda P\mu}{3RT} \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} = \frac{\lambda P}{3} \sqrt{\frac{8\mu}{\pi RT}}, \quad (7)$$

где λ – средняя длина свободного пробега молекул пара (м).

Так как на обеих границах парогазовой оболочки (со стороны металла и со стороны электролита) скорости движения пара различаются, принимается, что средняя скорость потока пара примерно в два раза меньше максимальной. Таким образом

$$v = \frac{\rho g \delta^2}{4\eta_v}. \quad (8)$$

Количество жидкости, испаряющейся с поверхности активного электрода в единицу времени, должно соответствовать массе пара, удаляемого вверх из парогазовой оболочки. Это условие можно записать как

$$\frac{UjS}{c\Delta T + \psi + c_v\Delta T_v} = \rho_v v \delta Z, \quad (9)$$

где j – плотность тока ($\text{A}/\text{м}^2$), Z – средний гидравлический размер поверхности (м), для прямоугольной формы рассчитывается как $Z = \frac{2 \cdot a \cdot b}{(a+b)}$ a, b – ширина и длина (м), $S = ab$ – площадь катода (м^2).

И отсюда

$$\frac{Ujab}{c\Delta T + \psi + c_v\Delta T_v} = \delta^3 \frac{2 \cdot a \cdot b}{(a+b)} \frac{P\mu\rho g}{4\eta_v RT} \quad (10)$$

И получаем выражение для толщины ПГО

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{2RT\eta_v Uj(a+b)}{(c\Delta T + \psi + c_v\Delta T_v)P\mu\rho g}}$$

Заключение

В заключение отмечается, что в ходе проведённого исследования предложена методика расчёта толщины парогазовой оболочки, образующейся при катодном нагреве в электролитно-плазменных процессах. Методика основана на энергетическом подходе и учитывает влияние плотности тока, напряжения, теплофизических свойств электролита и параметров теплоотдачи. Рассмотрен процесс формирования парогазовой оболочки как результат перехода от пузырькового к плёночному кипению электролита

при повышении напряжения. Основное падение потенциала и выделение тепла происходят в области оболочки, что определяет характер распределения энергии в прикатодной зоне. На основе анализа рассчитаны зависимости толщины парогазовой оболочки от энергетических параметров процесса. Установлено, что с увеличением плотности тока и напряжения наблюдается рост толщины оболочки и повышение интенсивности нагрева поверхности катода.

Полученные зависимости могут использоваться при оценке режимов катодного нагрева и выборе параметров электролитно-плазменной обработки. Представленные результаты дают возможность описывать условия устойчивого формирования парогазовой оболочки и использовать их при дальнейшем моделировании тепловых и электрических процессов в околоскатодной области.

Благодарность: Данное исследование финансировалось Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № АР19178097).

Список литературы:

1. Кравченко, А.В., Кублановский, В.С., Пивоваров, А.А., Пустовойтенко, В.П. Низкотемпературный плазменный электролиз: теория и практика. М.: Днепропетровск ООО «Акцент ПП», 2013. – 229 с.
2. Синькович, Ю. А. Современные представления о механизме электрической проводимости парогазовой оболочки в условиях электролитной анодной обработки / Ю. А. Синькович // Машиностроение : республиканский межведомственный сборник научных трудов / Белорусский национальный технический университет ; гл. ред. В. К. Шелег. – Минск : БНТУ, 2015. – Вып. 29. – С. 102-107.
3. Поляков, З.И., Исаков, В.М., Исаков, Д.В., Шамин, В.Ю. Электрофизические и электрохимические методы обработки: Учебное пособие для студентов-заочников. – 2-е изд., перер. и доп. – Челябинск: ЮУрГУ, 2006. – 89 с..
4. Бабенко, В.П. Линейные стабилизаторы напряжения и тока учебное пособие / В.П. Бабенко, В.К. Битюков; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, МИРЭА-Российский технологический университет. – Москва : МИРЭА, 2018. – 147 с.
5. Левин, О.В. Экспериментальное исследование и моделирование электродных процессов в плёнках проводящих и редокс-полимеров : автореферат дис. ... доктора химических наук : 02.00.05 / С.-Петербург. гос. ун-т. – Санкт-Петербург, 2017. – 40 с.
6. Дискаева, Е.Н. Исследование свойств приэлектродного слоя магнитной жидкости по эллипсометрическим и электрофизическим измерени-

ям : автореферат дис. ... кандидата физико-математических наук : 01.04.13 / Ставроп. гос. ун-т. – Ставрополь, 2006. – 20 с.

7. Хохряков, Е.В. Физико-химические закономерности образования многокомпонентных функциональных покрытий в микроплазменном режиме : автореферат дис. ... кандидата химических наук : 02.00.04 / Том. гос. ун-т. – Томск, 2004. – 23 с.

8. Капуткин, Д. Е., Дураджи, В. Н., Капуткина, Н. А. Ускоренное диффузионное насыщение поверхности металлов при электро-химико-термической обработке //Физика и химия обработки материалов. – 2020. – Т. 2. – С. 48-57. – URL: https://kvadromir.com/chertov_thermodynamics.html (дата обращения 01.11.2025).

Информация об авторах:

Қадырболат Нұрлат Ерболұлы, студент гр. ТЭ-201, НАО «Шәкәрім университет», 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, д. 20 А: ersinnur44@gmail.com

Кусаинов Ринат Кенжеевич , руководитель ИЦ "Упрочняющие технологии и покрытия, НАО «Шәкәрім университет», 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, д. 20 А, rinat.kus@mail.ru

Қанағат Айым Қайрғазықызы, студент гр. ПЗС-22-04, НАО «Шәкәрім университет», 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, д. 20 А, aiym.kanagatova@bk.ru

Алдажуманов Жан Касенович, старший преподаватель, НАО «Шәкәрім университет», 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, д. 20 А, aldazhumanov.zhan@yandex.kz

Леонидова Айым Бауыжанқызы, докторант гр. ДТФ-301.1, НАО «Шәкәрім университет», 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, д. 20 А, aiymleonidova1994@gmail.com

Курмангалиев Ринат Хамитулы, докторант гр. ДТФ-301.1, НАО «Шәкәрім университет», 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, д. 20 А, rinat_real@rambler.ru