

УДК 536.24

DOI 10.17513/snt.40608

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА В СИСТЕМЕ «МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОД – ПЛАЗМЕННАЯ ПАРОГАЗОВАЯ ОБОЛОЧКА – ЭЛЕКТРОЛИТ»

¹Кашапов Н.Ф. ORCID ID 0000-0002-1185-4605,^{2,3}Кашапов Л.Н. ORCID ID 0000-0001-7893-440X,²Чебакова В.Ю. ORCID ID 0000-0002-0785-3861,⁴Кашапов Р.Н. ORCID ID 0000-0003-2174-4394

¹Институт механики и машиностроения федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Казань, Российская Федерация;

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Казанский федеральный университет», Казань, Российская Федерация, e-mail: vchebakova@mail.ru;

³Институт прикладных исследований государственного научного бюджетного учреждения «Академия наук Республики Татарстан», Казань, Российская Федерация;

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский и испытательный институт медицинской техники» Росздравнадзора, Москва, Российская Федерация

В работе проведено численное моделирование тепловых процессов, происходящих в системе «металлический электрод – плазменно-парогазовая оболочка – электролит» при электролитно-плазменном разряде. Разработанная модель описывает распределение энергии между основными элементами системы и учитывает совокупность факторов, влияющих на тепловой баланс: джоулев нагрев плазмы и электролита, экзотермические реакции на поверхности анода, теплопередачу между фазами и потери за счет испарения и излучения. Полученные расчетные данные позволяют определить соотношение потоков энергии и температурные поля в межэлектродном пространстве при различных режимах напряжения и плотности тока. Показано, что наибольшая часть электрической мощности преобразуется в тепло, расходуемое на нагрев и кипение электролита, тогда как доля, приходящаяся на сам электрод, не превышает нескольких процентов. Температура поверхности анода достигает максимума в ограниченном диапазоне напряжений (~180–220 В), что соответствует оптимальному режиму электролитно-плазменного полирования. При превышении этого порога наблюдается интенсификация парообразования и рост теплоотдачи, что ограничивает дальнейший нагрев. Сопоставление с экспериментальными результатами подтвердило достоверность расчетных зависимостей и возможность применения модели для прогнозирования и оптимизации параметров электрохимической обработки металлов и сплавов. Модель может быть адаптирована для анализа процессов плазменно-электролитного насыщения, оксидирования и других высокотемпературных поверхностных технологий.

Ключевые слова: электролитно-плазменный разряд, тепловой баланс, математическое моделирование, межэлектродное пространство, теплообмен

INVESTIGATION OF THE THERMAL BALANCE IN THE “METAL ELECTRODE – PLASMA VAPOR – GAS SHELL – ELECTROLYTE” SYSTEM

¹Kashapov N.F. ORCID ID 0000-0002-1185-4605,^{2,3}Kashapov L.N. ORCID ID 0000-0001-7893-440X,²Chebakova V.Yu. ORCID ID 0000-0002-0785-3861,⁴Kashapov R.N. ORCID ID 0000-0003-2174-4394

¹Institute of Mechanics and Mechanical Engineering “Federal Research Center “Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”, Kazan, Russian Federation;

²Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Kazan Federal University”, Kazan, Russian Federation, e-mail: vchebakova@mail.ru;

³Institute of Applied Research of the State Scientific Budgetary Institution “Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan”, Kazan, Russian Federation;

⁴Federal State Budgetary Institution “All-Russian Scientific Research and Testing Institute of Medical Technology” Roszdravnadzor, Moscow, Russian Federation

The paper presents numerical modeling of thermal processes occurring in the “metal electrode-plasma-vapor-gas shell – electrolyte” system during an electrolyte-plasma discharge. The developed model describes the energy distribution between the main elements of the system and takes into account a set of factors affecting the thermal balance: Joule heating of plasma and electrolyte, exothermic reactions on the anode surface, heat transfer between phases and losses due to evaporation and radiation. The calculated data obtained make it possible to determine the ratio of energy fluxes and temperature fields in the interelectrode space under different voltage and current density conditions. It is shown that the largest part of the electrical power is converted into heat, which is spent on

heating and boiling the electrolyte, while the proportion of the electrode itself does not exceed several percent. The surface temperature of the anode reaches a maximum in a limited voltage range (~180-220 V), which corresponds to the optimal mode of electrolyte-plasma polishing. When this threshold is exceeded, there is an intensification of vaporization and an increase in heat transfer, which limits further heating. Comparison with the experimental results confirmed the reliability of the calculated dependences and the possibility of using the model to predict and optimize the parameters of electrochemical processing of metals and alloys. The model can be adapted to analyze plasma-electrolyte saturation, oxidation, and other high-temperature surface technologies.

Keywords: electrolyte-plasma discharge, thermal balance, mathematical modeling, interelectrode space, heat exchange

Введение

Электролитно-плазменная обработка металлов и сплавов (ЭПО) – перспективный метод поверхностной обработки, сочетающий электрохимическое воздействие и локальный высокотемпературный разряд в электролите [1, 2]. При достаточно высоком напряжении на границе металл – электролит возникает парогазовая оболочка, ионная проводимость которой приводит к возникновению плазменного разряда между металлом (анодом) и электролитом (катодом либо специальным электродом) [3, 4]. Такая плазма в межэлектродном промежутке генерирует значительное тепло, вызывая нагрев поверхностного слоя металла, электролита и выделение пара [5, 6]. Контролируемый нагрев позволяет реализовать различные технологические процессы. Для понимания и управления такими процессами необходимо количественное соотношение между подводом энергии и ее распределением между различными элементами системы. В литературе описаны экспериментальные исследования температурных режимов электролитно-плазменных разрядов [3, 6]. В [7] описаны модели теплообмена в подобных системах. В частности, показано, что при определенных условиях температура активного анода не превышает ~100–110 °С, что позволяет выполнять полирование стали без отпускной выдержки и без структурных превращений в поверхностном слое [8].

Цель исследования – изучение распределения тепловых потоков в межэлектродном пространстве при различных условиях разряда в системах металлический электрод – плазма – электролит.

Материалы и методы исследования

Предположения при построении модели: геометрия межэлектродного промежутка рассматривается осесимметричной; парогазовая оболочка вокруг анода считается равномерной по толщине; стационарное состояние (установившийся тепловой режим) достигается за время импульса разряда.

Основу модели составляет баланс мощности, выделяемой в процессе разряда, и мощности, рассеиваемой в системе. Теплота выделяется за счет протекания электри-

ческого тока через плазму (джоулев нагрев) и за счет экзотермических реакций (например, окисление металла анода). Расходуется энергия на нагрев материалов и теплоотдачу в окружающую среду. Баланс тепла можно записать следующим уравнением:

$$Q_e + Q_{\text{react}} = Q_a + Q_k + Q_{\text{sol}} + Q_{\text{vap}} + Q_{\text{rad}}, \quad (1)$$

где Q_e – количество теплоты, выделяемое током в плазме и электролите; Q_{react} – теплота химических реакций (например, окисления анода); Q_a и Q_k – тепло, переданное соответственно аноду (детали) и катоду; Q_{sol} – теплота, ушедшая на нагрев жидкого электролита; Q_{vap} – тепловой поток, унесенный образующимся паром; Q_{rad} – потери на излучение в окружающую среду. Левая часть уравнения (1) характеризует приход энергии, правая – ее распределение между компонентами системы [9, 10].

Каждый член баланса вычисляется на основе физических соотношений. Так, количество джоулевой теплоты определяется законом Джоуля – Ленца:

$$Q_e = UI t, \quad (2)$$

где U – напряжение между электродами; I – сила тока разряда; t – время (длительность воздействия в рассматриваемом режиме). Теплота реакции окисления металла анода рассчитывается как $Q_{\text{oxid}} = qV$, где q – удельная теплота реакции (например, для окисления железа $q \approx 822$ кДж/моль [11]), V – количество прореагировавшего металла (моль). Тепловые потоки Q_a , Q_k , Q_{sol} а вычисляются путем решения уравнений теплопроводности и конвективного теплообмена для анода, катода и объема электролита соответственно, с граничными условиями, заданными конфигурацией задачи.

Для оценки теплоотдачи паром Q_{vap} используется коэффициент теплообмена испарения, определенный по эмпирическим зависимостям [12, 13]. Потери на излучение Q_{rad} оцениваются по закону Стефана – Больцмана, исходя из площади и средней температуры светящейся области разряда. Решение уравнения баланса (1) проводится итерационно до сходимости, при которой сумма тепловых потоков правой части равна общей выделенной теплоте (левая часть). Параметры модели (электропровод-

ность плазмы, коэффициенты теплоотдачи и др.) подбираются согласно данным литературы [14, 15] и результатам собственных экспериментов.

Для верификации модели использованы данные по электролитно-плазменному полированию стали 20Х13 в струйном режиме [8]. Металлический образец (анод) площадью $\sim 0.03 \text{ м}^2$ погружался в поток водного электролита (10% водный раствор карбамида) при температуре $\sim 25^\circ\text{C}$. Катодом служил полый трубчатый модуль, через который подавался электролит (обратный поток). Напряжение источника питания варьировали от 0 до 500 В, ток в импульсном режиме не превышал 6 А. Температура на поверхности анода измерялась термопарой и плавкими индикаторами [16, 5]; также фиксировалась температура жидкости (в сборнике электролита) и пара (в уловителе). Погрешность измерений оценивалась в $\pm 5^\circ\text{C}$. Эти экспериментальные результаты использованы для сравнения с расчетными данными.

Результаты исследования и их обсуждение

Расчеты показывают, что до $\sim 50\text{--}55\%$ энергии тока поглощается электролитом (водой) и уносится в виде нагревающейся жидкости. Около $10\text{--}15\%$ уносится испаряющейся влагой и излучением в окружающую среду. На нагрев самих электродов расходуется сравнительно меньшая доля энергии: порядка $30\text{--}35\%$ уходит в массивный катодный модуль и лишь $3\text{--}5\%$ – непосредственно в обрабатываемый металлический анод. Эти результаты соответствуют экспериментальным наблюдениям: температура небольшого анода повышается относительно умеренно, тогда как значительная часть выделившегося тепла рассеивается в объеме электролита и на стенках камеры [6, 10].

В таблице приведены расчетные стационарные температуры основных элементов системы для режимов, близких к максимальному тепловыделению в рассматриваемых экспериментах при 220 В и 5,5 А.

Видно, что поверхность анода достигает порядка 110°C , тогда как объемный электролит нагревается до $\sim 90^\circ\text{C}$. Температура парогазовой среды и стенок камеры также находится в пределах $100\text{--}110^\circ\text{C}$. Эти величины хорошо согласуются с измеренными в экспериментах значениями [17], подтверждая адекватность модели. Отметим, что указанные температуры относятся к полировочному режиму, при котором отсутствует интенсивное искровое расплавление или оплавление материала анода [8].

В режиме же электротермического насыщения (например, плазменной цементации) целенаправленно достигаются более высокие температуры анода ($600\text{--}900^\circ\text{C}$) за счет использования иного состава электролита и увеличения энергии разряда.

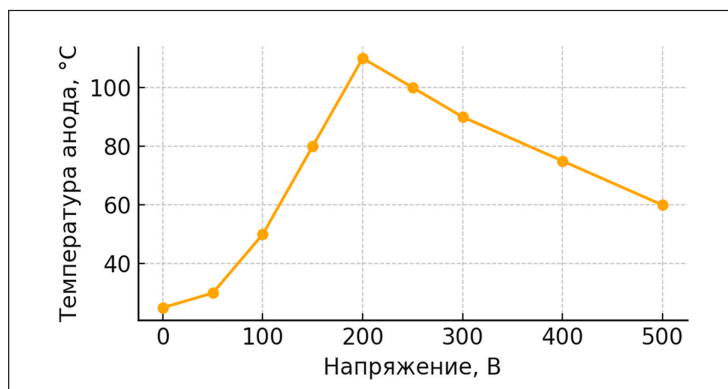
Важным результатом моделирования является определение влияния режима разряда (приложенного напряжения, гидродинамических условий) на температурное состояние анода. Расчетная зависимость максимальной температуры поверхности анода от напряжения представлена на рисунке.

При погружении образца в неподвижный электролит (электролиз без плазмообразования) температура незначительно повышается с ростом U за счет омического нагрева электролита. Однако при достижении порога образования устойчивой парогазовой оболочки ($\sim 150\text{--}180 \text{ В}$ для данных условий) наблюдается резкий рост температуры анода, связанный с переходом в режим развитого электролитно-плазменного разряда. Максимум температуры ($\sim 110^\circ\text{C}$) соответствует интервалу $180\text{--}220 \text{ В}$, после чего при дальнейшем повышении напряжения температура несколько снижается. Модель объясняет это тем, что в области сверхкритических напряжений возникают неустойчивые разряды и интенсивное кипение (разбрызгивание электролита), что усиливает теплоотвод от анода и ограничивает дальнейший рост его температуры. Таким образом, существует оптимальный диапазон U , в котором локальный тепловой режим наиболее интенсивен.

Пример распределения температур между компонентами системы (расчет при $U = 220 \text{ В}$, $I = 5,5 \text{ А}$, время 30 с)

Компонент системы	Температура, $^\circ\text{C}$ (стационарная)
Поверхность анода (сталь 20Х13)	110 ± 5
Жидкий электролит (в ванне)	87 ± 5
Парогазовая среда (уловитель пара)	105 ± 5
Стенки рабочей камеры	100 ± 5
Катодный модуль (трубка)	~ 30

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.



Зависимость максимальной температуры поверхности анода от напряжения между электродами (расчетные данные для стали 20Х13 в 10%-ном растворе карбамида)

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Данная картина соответствует экспериментально наблюдаемому характеру зависимости температуры анода от напряжения [18]. Добавление принудительной циркуляции электролита (струйный режим) приводит к снижению абсолютных значений температуры за счет улучшенного охлаждения поверхности. Например, при фокусированной струе электролита температура анода поддерживается на уровне лишь ~60–80 °C даже при 300–400 В, что используется для деликатного полирования без термического воздействия на структуру стали [8].

Результаты моделирования показывают, что энергетический баланс в электролитно-плазменной системе существенно смещен в сторону поглощения тепла электролитом. Это означает, что жидкая фаза электролита играет роль эффективного охлаждающего агента, отводящего более половины выделяемой энергии. Данный вывод согласуется с экспериментальными фактами: визуально наблюдается интенсивное кипение электролита вокруг нагретого электрода, а измеренная температура потока жидкости возрастает значительно (до ~80–90 °C) даже при умеренном разряде [17].

Нагрев металлического анода, напротив, относительно невелик – не более 100–120 °C в полировочных режимах. Это объясняется малой долей энергии, идущей непосредственно в твердый металл, и постоянным отводом тепла в объем электролита и на катод. Катодный модуль в проводимых экспериментах имел значительно большую поверхность и тепловую массу, чем анод, поэтому около трети тепла уходит в катод и рассеивается в окружающей среде (через систему охлаждения катодного узла). Таким образом, межэлектродное пространство функционирует как своеобразный кипящий калорифер, где электрическая энергия пре-

образуется преимущественно в тепло жидкой фазы.

Максимум на графике зависимости температуры анода от напряжения (рисунок) указывает на наличие наиболее эффективного режима с точки зрения локального нагрева поверхности. В случае электрополирования этот режим соответствует верхней границе стабильного горения разряда, дающего наивысшую температуру, не вызывая при этом дефектов поверхности. Экспериментально известно, что полирование сталей в электролитно-плазменном разряде протекает эффективно при напряжениях близких к порогу кипения электролита, после чего дальнейшее увеличение напряжения малоцелесообразно. С другой стороны, для задач термохимического насыщения (например, диффузионного насыщения углеродом или азотом) требуется максимальный нагрев поверхности. Этого достигают в режиме интенсивного искрового разряда (непрерывное кипение, режим разбрызгивания), при котором температура металлического анода может быть доведена до 600–800 °C и поддерживаться в течение необходимого времени обработки. Однако подобный режим сопряжен с риском эрозии и расплавления поверхности, поэтому важен компромисс между стабильностью разряда и интенсивностью нагрева.

Заключение

Построенная в данной работе математическая модель не учитывает сложных нестационарных эффектов – например, периодические колебания тока и образования пузырьков пара, которые могут приводить к колебаниям температуры. Тем не менее усредненные результаты баланса хорошо описывают общие тенденции, позволяющие оптимизировать режимы обработки. Так,

на наличие наиболее эффективного режима с точки зрения локального нагрева поверхности указывает максимум в зависимости стационарной температуры анода от напряжения. В случае электрополирования этот режим соответствует верхней границе стабильного горения разряда, дающего наибольшую температуру, не вызывая при этом дефектов поверхности. Экспериментально известно, что полирование сталей в электролитно-плазменном разряде протекает эффективно при напряжениях близких к порогу кипения электролита, после чего дальнейшее увеличение напряжения малоцелесообразно. Дальнейшее развитие модели может включать учет динамики парообразования и гидродинамики потока электролита, а также влияние геометрии и размеров электродов. Кроме того, планируется расширить модель для различных составов электролита, что позволит прогнозировать температурные поля для процессов плазменно-электролитного азотирования, оксидирования и др., где возможны дополнительные источники или стоки тепла (эндо- или экзотермические химические реакции в плазме, растворение электродов и пр.).

Список литературы

1. Danilov I., Hackert-Oschätzchen M., Zinecker M., Meichsner G., Edelmann J., Schubert A. Process Understanding of Plasma Electrolytic Polishing through Multiphysics Simulation and Inline Metrology // *Micromachines*. 2019. Vol. 10. Is. 3. Art. 214. DOI: 10.3390/mi10030214.
2. Huang Y., Wang C., Ding F., Yang Y., Zhang T., He X., Zheng L., Li N. Principle, process, and application of metal plasma electrolytic polishing: A review // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2021. Vol. 114. P.1893–1912. DOI: 10.1007/s00170-021-07012-7.
3. Kashapov L.N., Kashapov N.F., Kashapov R.N. Investigation of the influence of plasma-electrolytic processing on the surface of austenitic chromium-nickel steels // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013. Vol. 479. Art. 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/479/1/012003.
4. Ji G.Q., Ma L.F., Zhang S.N., Zhang J., Wu L.Y. Study of Electrochemical Behavior and a Material Removal Mechanism During Electrolytic Plasma Polishing of 316L Stainless Steel // *Materials*. 2025. Vol. 18. Is. 6. Art. 1307. DOI: 10.3390/ma18061307.
5. Kashapov R.N., Kashapov L.N., Kashapov N.F. Investigations of the growth of the vapor-air shell of a gas discharge with a liquid electrolytic cathode of sodium hydroxide solution // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. Vol. 927. Art. 012085. DOI: 10.1088/1742-6596/927/1/012085.
6. Kashapov L.N., Kashapov N.F., Kashapov R.N., Pashaev B.Y. The application of additive technologies in creation a medical simulator-trainer of the human head operating field // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2016. Vol. 134. Art. 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/134/1/012011.
7. Kashapov L.N., Rudyk A.N., Kashapov R.N. Applying 3D-printing technology in planning operations of cancer patients // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2014. Vol. 69. Art. 012016. DOI: 10.1088/1757-899X/69/1/012016.
8. Yan T., Wang S., He W., Jin R., Zhao J., Zou Y., Ouyang J., Wang Y., Zhou Y. Precision Machining of Different Metals by Plasma Electrolytic Polishing: A Review for Improving Surface Smoothness and Properties // *Lubricants*. 2025. Vol. 13. Is. 9. Art. 412. DOI: 10.3390/lubricants13090412.
9. Kashapov R.N., Kashapov L.N., Kashapov N.F. Formation of cracks and pores in the surface layer of sintered materials during plasma electrolytic treatment // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2017. Vol. 240. Art. 012074. DOI: 10.1088/1757-899X/240/1/012074.
10. Doche M.-L., Novel-Chevallier A., Mandroyan A. et al. Electropolishing of 316L stainless steel parts elaborated by selective laser melting: from laboratory to pilot scale. *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 108. P. 722–727. DOI: 10.1016/j.procir.2022.04.080.
11. Quitzke S., Mendala J., Olschok S., Kießling R., Biermann D., Tillmann W., Walther F. Design and setup of a jet-based technology for localized small-scale plasma electrolytic polishing // *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. Vol. 75. P. 1123–1133. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.01.064.
12. Ghezri A., Ibrahim R.N., Kaki B. et al. Energy Efficient Jet Polishing via Electrolytic Plasma Enhances Corrosion Resistance in Stainless Steel // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2024. Vol. 8. Is. 6. P. 289. DOI: 10.3390/jmmp8060289.
13. An S., Hansen L., Wolff T. et al. Energetic characterization during plasma electrolytic polishing of cemented tungsten carbide // *Journal of Applied Physics*. 2023. Vol. 134. Is. 3. Art. 033305. DOI: 10.1063/5.0155581.
14. Ji G., Ma L., Wu L. Effect of the gas layer evolution on electrolytic plasma polishing of stainless steel. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 21824. DOI: 10.1038/s41598-024-74263-1.
15. An F., Zhang L., Na S.J. Effects of plasma electrolytic polishing on the surface and mechanical properties of Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si specimen fabricated by laser powder bed fusion // *Journal of Manufacturing Processes*. 2024. Vol. 131. P. 283–296. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.09.035.
16. Seo B., Kim H., Kim S. et al. Corrosion behavior of additive manufactured CoCr parts polished with plasma electrolytic polishing // *Surface & Coatings Technology*. 2021. Vol. 406. Art. 126640. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126640.
17. Yan X., Wang B., Wang L., Han Y., Han C. Jet electrolytic plasma polishing process for high temperature alloy additive manufacturing of large size surfaces // *AIP Advances*. 2025. Vol. 15. Is. 3. Art. 035147. DOI: 10.1063/5.0250696.
18. Korothe J.E., Baş R., Reyes Valdés F.A., et al. Plasma electrolytic polishing of additively manufactured metal parts: surface integrity and corrosion behavior // *Open Research Europe*. 2024. Vol. 4. Art. 48. DOI: 10.12688/openreseurope.16902.1.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена за счет предоставленного в 2024 г. Академией наук Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и прикладных научных работ в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

Financing: The work was carried out at the expense of a grant provided in 2024 by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan for the implementation of fundamental and applied scientific work in scientific and educational organizations, enterprises and organizations of the real sector of the economy of the Republic of Tatarstan.