

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОВОЛОЧНО-ВЫРЕЗНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Н. В. Бобков, А. А. Федоров, Н. С. Артеменко

Омский государственный технический университет, г. Омск

В статье предлагается методика моделирования процессов проволочно-вырезной электроэрозионной обработки методом конечных элементов. Описаны основные подходы к расчету тепловых полей, анализу дефектного слоя и фазовых превращений, возникающих при обработке материалов. Рассмотрена возможность использования модели для прогнозирования глубины дефектного слоя и топографии обработанной поверхности. Предложенная методика позволяет оценивать влияние параметров обработки на качество заготовок из титановых и циркониевых сплавов. Методика может применяться в авиационной и космической промышленности, медицине, судостроении и других отраслях, где требуется высокая точность обработки сложных деталей.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, моделирование, конечные элементы, дефектный слой, параметры обработки, распространение тепловой энергии, тугоплавкие металлы.

Для цитирования: Бобков Н. В., Федоров А. А., Артеменко Н. С. Моделирование процесса проволочно-вырезной электроэрозионной обработки методом конечных элементов // Омский научный вестник. 2025. № 2 (194). С. 41–48. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-41-48. EDN: UMOBKZ.



© Бобков Н. В., Федоров А. А., Артеменко Н. С., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

MODELING OF WIRE-CUT ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING PROCESS BY FINITE ELEMENT METHOD

N. V. Bobkov, A. A. Fedorov, N. S. Artemenko

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

The paper proposes a methodology for modeling of wire-cut electrical discharge machining processes by finite element method. The authors describe the main approaches to calculating thermal fields by analyzing the recast layer and phase transformations occurring during material processing. Moreover, the article considers the feasibility of using the model to predict the depth of the recast layer and the topography of the processed surface. The proposed methodology allows estimating the influence of machining parameters on the quality of titanium and zirconium alloy blanks. The methodology can be applied in aviation and space industry, medicine, shipbuilding and other industries where high precision machining of complex parts is required.

Keywords: electrical discharge machining, modeling, finite elements, defect layer, machining parameters, heat energy distribution, refractory metals.

For citation: Bobkov N. V., Fedorov A. A., Artemenko N. S. Modeling of wire-cut electrical discharge machining process by finite element method. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 2 (194). P. 41–48. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-41-48. EDN: UMOBKZ.



© Bobkov N. V., Fedorov A. A., Artemenko N. S. 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

В 1940-х гг. Борис Романович Лазаренко со своей супругой Наталией Иоасафовной Лазаренко [1] исследовали снижение электроконтактной корро-

зии (электрической коррозии) и обнаружили, что она неизбежна. Было решено применить принцип электрокоррозии в производственной сфере, а также разработать контролируемый процесс об-

работки труднообрабатываемых материалов, то есть использование контролируемых условий разряда для прецизионной обработки [2]. Технология электроэрозионной обработки позволяет обрабатывать материалы высокой твердости сложной формы. Впервые она была использована при обработке аэрокосмических сплавов и производстве пресс-форм в 1950-х гг. Повышение производительности, а также точное и быстрое изготовление деталей сложной формы имеют решающее значение.

В процессе электроэрозионной обработки искра вызывает испарение и плавление материала двух электродов (инструмента и заготовки) в узком пространстве, заполненном диэлектрической жидкостью, в течение нескольких микросекунд. Материалы в зоне испарения удаляются непосредственно путем испарения, а большая часть материалов в зоне плавления отделяется от матричных материалов под высоким давлением нагнетательного канала. Наблюдение процесса и количественная оценка механизма удаления материала с помощью экспериментов при чрезвычайно сложных физических свойствах электрической искры (плазмы) в процессе разряда затруднительны [3, 4]. Таким образом, большинство исследователей разрабатывают модели процесса электроэрозионной обработки для точного прогнозирования формы кратера, топографии поверхности, скорости удаления материала, дефектного слоя и скорости износа инструмента.

В последние годы развиваются молекулярно-динамические и полевые модели. Ранние подходы метода конечных элементов (МКЭ) ограничивались 2-мерными моделями теплового потока с использованием полуконечного [5–7] или бесконечного [8] цилиндрического электрода. Гипотезы включали цилиндрическую искровую плазму [5, 6], дисковый [5, 6] или точечный источник тепла [9], а также постоянный источник [5, 8] и радиус теплового потока [10, 11], часто с постоянными теплофизическими свойствами [8, 12].

Salah и Ghanem [13] разработали модель теплопереноса, где тепловые источники распределяются по Гауссу, а теплопроводность связана с температурой, повышая точность моделирования [14]. МКЭ используется для анализа топографии поверхности при непрерывных разрядах, распределения энергии [15, 16], радиуса канала разряда [17] и движения плазмы [18]. Современные модели также охватывают ультразвуковую обработку, магнитные поля и вспомогательные электроды для керамических материалов [19–23].

Молекулярно-динамическое моделирование (МД) позволяет изучать характеристики материалов на атомарном уровне. Yang et al. [24] показали, что удаление материала связано с испарением и взрывом пузырьков перегретого металла. Yue [25] создал 3D МД-модель для анализа формирования дефектов в многокристаллической меди. Zhang [26] предложил гибридную модель, совмещающую МД и двухтемпературный подход, для изучения плавления материала в нано-электроэрозионной обработке (нано-ЭЭО). Данные модели также исследуют движение диэлектрика [27], транспорт мусора и пузырьков [28], а также износ электрода [29].

Анализ показывает, что подходы к моделированию электроэрозионной обработки делятся на три основные группы. Их распределение показано на рис. 1 [30].

Тип тепла в моделях электроэрозионной обработки (ЭЭО) играет ключевую роль. В работе [8]



Рис. 1. Сравнение трех типов моделирования по количеству опубликованных работ [38]

Fig. 1. Comparison of the three modeling types by number of published papers [38]

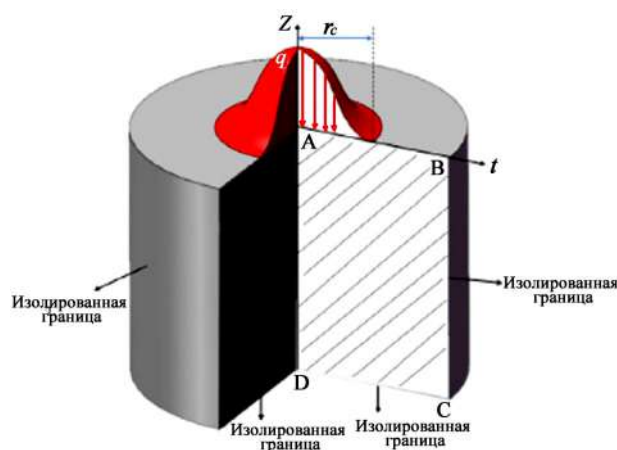


Рис. 2. Гауссово распределение тепла [38]

Fig. 2. Gaussian heat distribution [38]

предложен диск как источник тепла для катода с изоляцией внешней поверхности, активный в течение разрядов. Модель имела ограничение по длине электрода вдоль оси Z, снижая точность расчетов. В исследованиях [5, 13] использовался диск как тепловой источник для нагрева обоих электродов, но недостаточная адаптация к ЭЭО привела к ошибкам из-за низкой теплопередачи [6].

Параметры разряда (ток, напряжение) и свойства материалов изучались для анализа формы воронки и удаления материала. Модели также рассматривали влияние импульса тока на износ электрода, предлагая оптимальные формы для его минимизации [10].

Erden и Kaftanoglu [9] представили модель с равномерно распределенными точечными источниками, которая оказалась менее точной. Dibitonto и соавторы [31] использовали точечный источник на катоде и дисковый на аноде, определив распределение температуры. Каждый импульс трактовался как искра с долей энергии разряда 0,183, что согласовалось с экспериментальными данными.

Eubank и соавторы [32] показали, что гауссово распределение тепла более реалистично, чем дисковый источник, разработав модели для анода, катода и цилиндрической плазмы (рис. 2).

На основе гауссового источника тепла [33] разработана модель конечно-элементная модель (КЭМ) для предсказания распределения температуры катодного пятна разряда при одиночном разряде в ЭЭО. Моделирование визуализировало динами-

ческое распределение температуры в околошовной зоне, объясняя механизм удаления материала. В работе [34] представлена модель КЭМ с гауссовым источником тепла для анализа эффектов множественных разрядов. Экспериментальные данные показали, что эта модель предсказывает скорость удаления материала (СУМ) и шероховатость поверхности с ошибкой менее 6 %. Многоискровая модель с гауссовым источником тепла [35] продемонстрировала точность предсказаний шероховатости поверхности с ошибкой от 1,5 до 18 % при различных значениях тока и времени импульса.

Смешанное моделирование ЭЗО [36] использовало гауссово распределение тепла для расчёта температуры и оценки СУМ на основе температурных профилей. Эксперименты подтвердили высокую согласованность теоретических и практических результатов. Sundriyal и другие [37] предложили модель КЭМ для сухой ЭЗО, интегрированную с гауссовым тепловым воздействием, которая предсказывала скорость удаления материала с ошибкой менее 30 %, подтверждённой экспериментально.

Хотя для моделирования ЭЗО применяются КЭМ, молекулярно-динамические модели и модели потока имеют свои преимущества и ограничения. Наиболее популярны модели с цилиндрическим тепловым источником, однако перспективными считаются модели с гауссовым распределением. Несмотря на их высокую точность, они требуют значительных вычислительных ресурсов и сложны в настройке ограничений, а расчёты занимают значительно больше времени.

Как видно из литературного обзора, моделированию процессов, происходящих во время электроэрозионной обработки, уделено большое внимание различными исследовательскими коллективами по всему миру.

В каждом исследовании отмечается зависимость скорости обработки и качества поверхностного слоя от режимов обработки. При этом, говоря о качестве поверхностного слоя, подразумевается его чистота, а точнее наличие в нем материала электрода-инструмента и диэлектрической среды, а также различных фазовых превращений и трещинообразования.

Современные требования к точности, качеству поверхности и структурной однородности деталей, изготавливаемых из тугоплавких и труднообрабатываемых сплавов, таких как титановые и циркониевые, обуславливают необходимость глубокого понимания процессов, происходящих в зоне воздействия импульсной электроэрозии. В связи с усложнением геометрии деталей, ужесточением стандартов на шероховатость и требованиями по минимизации дефектных слоёв, традиционные экспериментальные подходы к исследованию процессов проволоочно-вырезной электроэрозионной обработки (ПЭЗО) оказываются недостаточными. Литературный обзор свидетельствует о высоком уровне интереса к численному моделированию ЭЗО, в частности к использованию метода конечных элементов, как к инструменту, позволяющему количественно предсказывать термические и фазовые изменения в зоне обработки, а также управлять режимами для достижения требуемого качества поверхности. Особую актуальность представляет разработка модели, способной отразить влияние режимных параметров на формирование дефектного слоя и фазовых превращений в микрообъёме материала, что крайне важно для критически нагруженных изделий, при-

меняемых в аэрокосмической, медицинской и судостроительной отраслях.

Целью настоящей работы является разработка и реализация методики численного моделирования процесса ПЭЗО с применением метода конечных элементов для оценки глубины термического воздействия, дефектного слоя и фазовых превращений в титановых и циркониевых сплавах, а также определение закономерностей влияния режимных параметров (времени импульса) на морфологию зоны обработки.

Для достижения поставленной цели в ходе работы решались следующие задачи:

1. Провести аналитический обзор современных подходов к моделированию процессов ЭЗО с акцентом на использование МКЭ, молекулярно-динамических моделей и моделей распределения тепла.
2. Разработать конечно-элементную модель импульсного теплового воздействия, реализованную в программной среде Ansys 21 с применением модуля Transient Thermal.
3. Смоделировать тепловое поведение титановой и циркониевой заготовок при различной длительности электрического разряда, учитывая фазовые переходы и температурные градиенты.
4. Оценить глубину расплавленного и дефектного слоев, а также зоны фазовых превращений в зависимости от времени импульса.
5. Провести сопоставление результатов моделирования с данными, известными из экспериментов и литературы, с целью верификации адекватности модели.
6. Обосновать практическое применение полученных данных для оптимизации режимов ПЭЗО с целью повышения качества обработки и минимизации структурных нарушений.

Материалы и методы исследования

Для теоретической оценки глубины залегания дефектного слоя и трещинообразования, а также фазовых превращений в поверхностном слое титановых и циркониевых заготовок, был произведен расчет с использованием программного продукта Ansys V.21. Главной задачей теоретических исследований был расчет глубины распространения температур, для определения глубины на которой возможно образование дефектов, таких как трещины и фазовые превращения. Для выполнения расчета был выбран модуль «Transient Thermal», позволяющий производить вычисления, основываясь на объемном распределении тепла в глубь заготовки, исходя из теплопроводности материала. Данный модуль требует наличие библиотеки материалов, подготовленную геометрию детали или всей сборки, разбиение каждой имеющейся детали на сетку конечных элементов и установки, в которых задаются ограничения. Тело заготовки представлено кубом 5х5х5 мм.

На первом этапе необходимо определить, какой материал будет выбран для каждого элемента. В первом приближении из библиотеки материалов для диэлектрической жидкости выбирается «Water liquid», для материала проволочного электрода-инструмента — «Copper Alloy NL», для циркониевого образца — «Zr», а для титанового — «Ti-6Al-4V».

На втором этапе необходимо создать геометрию каждого тела, входящего в расчет. Для этого изображается тело образца в виде параллелепипеда, также в виде параллелепипеда изображается диэлектрическая жидкость, в которую помещается цилиндриче-

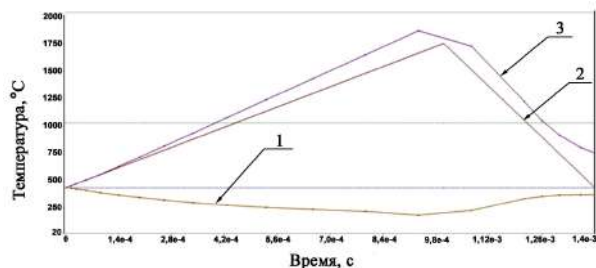


Рис. 3. Задание начальных параметров:

- 1 — график значений для воды;
2 — график значений для тела, эмитирующего электрический разряд; 3 — график реакции окружающей среды

Fig. 3. Setting initial parameters:

- 1 — graph of water values; 2 — graph of electric discharge emitting body values; 3 — graph of environmental response

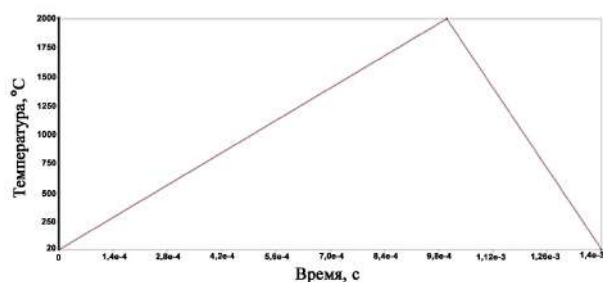


Рис. 4. Задание времени действия температур

Fig. 4. Setting the time of action for temperatures

ское тело (электрод-инструмент), диаметром 0,2 мм и длиной 5 мм, а между ним и заготовкой изображается цилиндр диаметром 0,002 мм и длиной 0,05 мм, имитирующий разряд.

Следующим шагом необходимо создать сетку конечных элементов, а перед этим необходимо выбрать ее размер для каждого элемента. Чем больше ячейка сетки, тем быстрее и менее требовательным к ресурсам будет расчет, однако при слишком крупной сетке расчет будет менее точным. Учитывая вышесказанное, была выбрана адаптивная сетка, принимающая меньший размер в местах контакта и более крупный — в остальных местах.

Далее необходимо задать граничные условия, при которых тела взаимодействуют друг с другом и какие начальные температуры имело каждое тело. Диэлектрическая жидкость задается как дистиллированная вода, которая имеет постоянную температуру 20 °C и взаимодействует с другими телами за счет конвекции (рис. 3).

Электрический разряд, проходящий от электрода-инструмента к циркониевой заготовке, представлен твердым телом, которое мгновенно нагревается до температуры 5000 °C и держит температуру в течение 3 мкс для первого прохода, для второго — 2,5 мкс, для третьего — 2,5 мкс и для четвертого — 1,5 мкс, передает тепло за счет контакта с поверхностью заготовки с помощью конвекции и излучения. Температура в 5000 °C обусловлена воздействием электрического импульса высокой мощности. При таком импульсе сила тока порядка 10 А и напряжение около 45 В. Значение температуры принято одинаковым для всех материалов и при разном времени воздействия. На рис. 4 показан пример задания температуры для четвертого прохода.

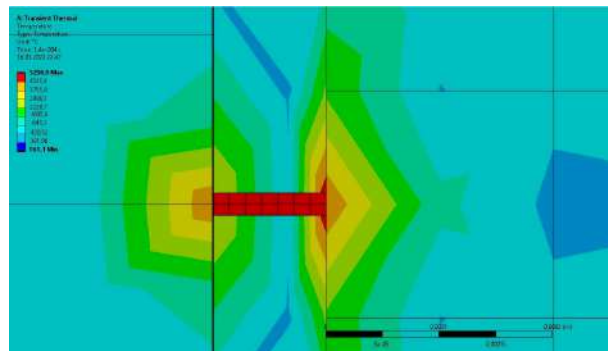


Рис. 5. Визуализация распространения тепловых волн, соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «on», равного 3 мкс (титановый сплав)

Fig. 5. Visualization of thermal wave propagation, corresponding value in the surface layers of the blank at the value of the parameter "on" equal to 3 mks (titanium alloy)

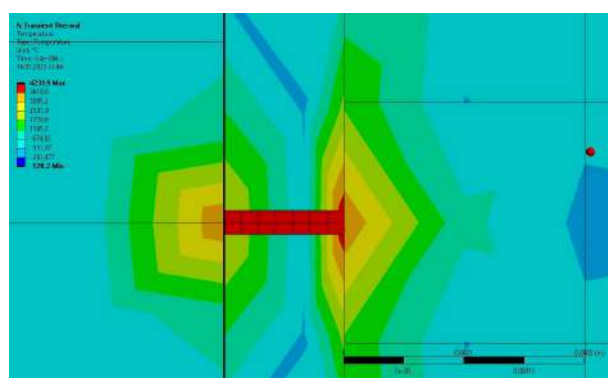


Рис. 6. Визуализация распространения тепловых волн соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «on», равного 2,5 мкс (титановый сплав)

Fig. 6. Visualization of thermal wave propagation, corresponding value in the surface layers of the blank at the value of the parameter "on" equal to 2,5 mks (titanium alloy)

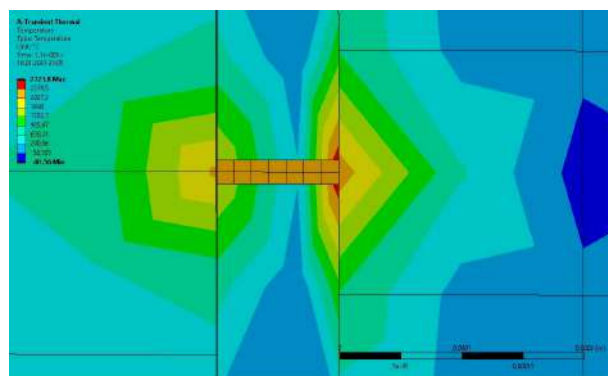


Рис. 7. Визуализация распространения тепловых волн соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «on», равного 2 мкс (титановый сплав)

Fig. 7. Visualization of thermal wave propagation, corresponding value in the surface layers of the blank at the value of the parameter "on" equal to 2 mks (titanium alloy)

Полученные результаты расчетов для титановых образцов отражены на рис. 5–8, где в разрезе оранжевым цветом отмечено нагретое тело (имитирующее разряд); слева от него — электрод-инструмент; справа — заготовка.

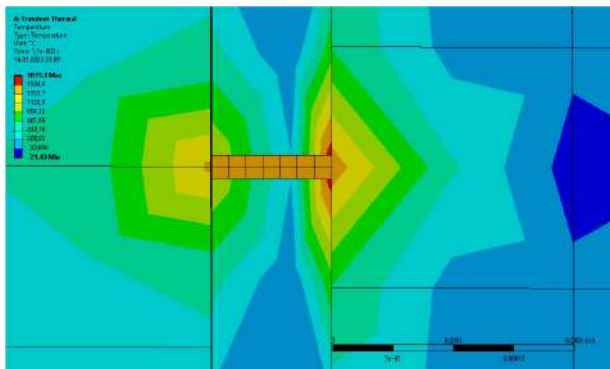


Рис. 8. Визуализация распространения тепловых волн соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «on», равного 1,5 мкс (титановый сплав)

Fig. 8. Visualization of thermal wave propagation, corresponding value in the surface layers of the blank at the value of the parameter "on" equal to 1,5 mks (titanium alloy)

Результаты расчёта показывают, что температура, необходимая для начала плавления титановых сплавов (примерно 1670 °С), не проникает на глубину более 100 мкм от поверхности. Это свидетельствует о том, что зона расплавленного материала, а следовательно, и зона первичного эрозионного разрушения ограничена этим значением. Принимая во внимание наличие переходной области между расплавленной и твердой фазой, а также возможное термическое влияние на подлежащие слои, можно утверждать, что глубина потенциального дефектного слоя, включающего микротрещины, переохлаждённые структуры или аморфные включения, не превышает 350 мкм от предельной границы зоны нерасплавленного материала или около 150 мкм от исходной поверхности детали до начала обработки.

Кроме того, в модели отслежено распространение температур, соответствующих пороговым значениям для фазовых превращений в титановых сплавах, например, температуры $\alpha \rightarrow \beta$ перехода (около 880 °С). Данная изотерма не распространяется в глубь заготовки на расстояние более 135 мкм от исходной внешней поверхности. Это означает, что структурные изменения, такие как перекристаллизация, рост β -фазы или образование метастабильных фазовых состояний, могут возникать только в пределах этой глубины. С учётом удаления поверхностного слоя после обработки (например, шлифованием или травлением) глубина реального воздействия фазовых превращений на готовую деталь составит не более 35 мкм.

Таким образом, полученные данные позволяют не только количественно оценить глубину температурного воздействия, но и прогнозировать характер термически индуцированных структурных изменений в материале. Эти результаты имеют практическую значимость при разработке режимов электроэрозионной обработки, направленных на минимизацию дефектов и обеспечение требуемых механических и эксплуатационных характеристик обработанных деталей. Результаты расчетов для циркониевых образцов отражены на рис. 9–12.

В случае моделирования ЭЭО циркониевых сплавов расчётные данные демонстрируют существенно более локализованный характер теплового воздействия по сравнению с титаном. Температурное поле в зоне действия разряда характеризуется

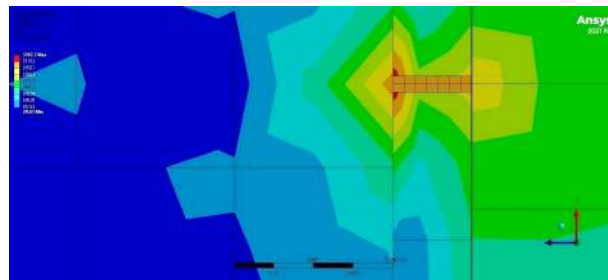


Рис. 9. Визуализация распространения тепловых волн соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «on», равного 3 мкс (циркониевый сплав)

Fig. 9. Visualization of thermal wave propagation, corresponding value in the surface layers of the blank at the value of the parameter "on" equal to 3 mks (zirconium alloy)

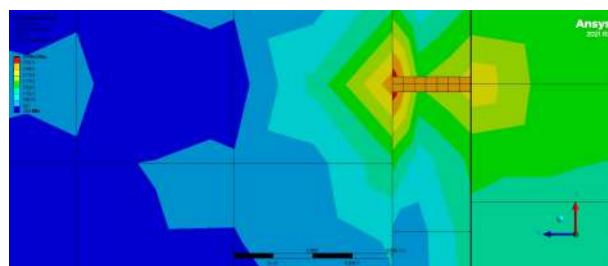


Рис. 10. Визуализация распространения тепловых волн соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «on», равного 2,5 мкс (циркониевый сплав)

Fig. 10. Visualization of thermal wave propagation, corresponding value in the surface layers of the blank at the value of the parameter "on" equal to 2,5 mks (zirconium alloy)

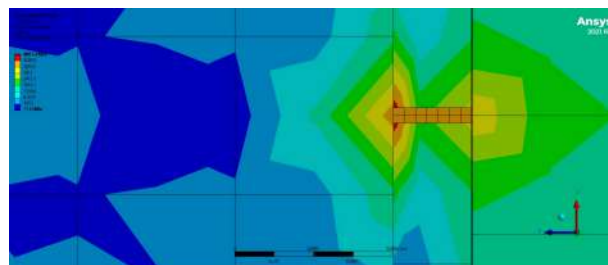


Рис. 11. Визуализация распространения тепловых волн соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «on», равного 2 мкс (циркониевый сплав)

Fig. 11. Visualization of thermal wave propagation, corresponding value in the surface layers of the blank at the value of the parameter "on" equal to 2 mks (zirconium alloy)

высокой концентрацией энергии в приповерхностных слоях материала, при этом глубина распространения температур, соответствующих порогу плавления циркония (1855 °С), ограничивается примерно 25 мкм. Такой результат указывает на крайне малую толщину зоны расплава, что является следствием как высокой температурной чувствительности циркония, так и особенностей выбранного режима импульсного нагрева (on — 2,5 мкс; off — 11 мкс; sv — 55 В). При таких условиях интенсивный тепловой импульс не сопровождается достаточным временем для глубокого распространения энергии в объёме материала.

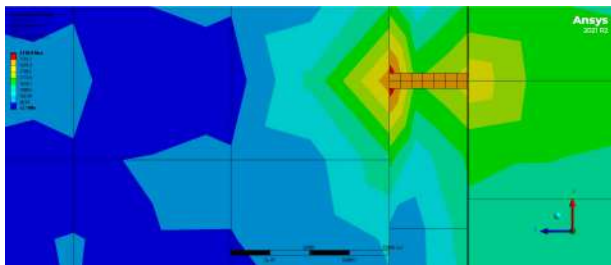


Рис. 12. Визуализация распространения тепловых волн соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «оп», равного 1,5 мкс (циркониевый сплав)

Fig. 12. Visualization of thermal wave propagation, corresponding value in the surface layers of the blank at the value of the parameter "on" equal to 1,5 mks (zirconium alloy)

Оценка потенциальной глубины термически нарушенного слоя показывает, что зона, в которой могут наблюдаться остаточные изменения структуры вследствие теплового воздействия, не превышает 45–50 мкм от исходной поверхности. Это делает циркониевые сплавы особенно чувствительными к повторным проходам и требует точного контроля съёма материала для обеспечения минимального влияния на приповерхностную структуру.

Кроме того, температурный уровень, достаточный для инициирования фазовых превращений в циркониевых сплавах (порядка 600 °C), также демонстрирует ограниченное проникновение вглубь заготовки. По результатам моделирования температура выше этого порога наблюдается лишь в пределах первых 150 мкм от поверхности. Это означает, что любые термически индуцированные изменения кристаллической решетки, такие как $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения, зарождение интерметаллидных фаз или перераспределение легирующих элементов, будут происходить исключительно в этом диапазоне. Такая ограниченность может быть как преимуществом (в случае, если важно сохранить исходную структуру), так и потенциальным источником проблем при необходимости глубокой термообработки или многократной обработки поверхности.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе численного моделирования данные позволяют сделать предварительные выводы о распределении температурного поля и масштабах термического воздействия при одиночном разряде в процессе ЭЭО. Температура в зоне действия разряда достигает 10 000 °C, при этом максимальные значения наблюдаются не на поверхности, а на небольшой глубине (около 25–200 мкм), что указывает на расплавление части заготовки. Температурный градиент в пределах кратера составляет порядка нескольких тысяч градусов, а характер температурного распределения остается симметричным, что отражает допущения, заложенные в модель. Стоит отметить, что подобная оценка не учитывает ряда факторов, которые в реальных условиях существенно влияют на общее течение процесса ЭЭО.

Так, несмотря на качественное совпадение температурных уровней с экспериментальными данными [38], численная модель демонстрирует некоторые идеализированные черты, в частности, строгую осевую симметрию температурного поля, плавный характер распределения температуры и резкое

ограничение зоны действия. Это может указывать на упрощения, принятые в расчетной схеме и физических допущениях модели. Для более полного анализа необходимо рассмотреть влияние факторов, не вошедших в текущую постановку задачи, но играющих существенную роль в реальных условиях обработки. Например, в модели не задавался учет механических эффектов, что влияет на некоторые отклонения от реального перераспределения тепла из-за образования плазменного канала и кавитационных пузырей. Поэтому реальный кратер в опытах отличается по форме (он менее симметричен и имеет зоны всплесков металла на краях). С точки зрения гауссового распределения теплового потока: центр разряда максимально нагрет, а по мере удаления температура резко падает. Такой результат также может быть вызван тем, что ANSYS не учитывает испарение материала явно, а только косвенно через температуру. Охлаждение в модели происходило только через боковые стенки, что не компенсирует интенсивность нагрева, и потому остаточное тепло сохраняется на большей площади. Это особенно характерно для моделирования в отсутствие конвекции со стороны диэлектрической жидкости, которая в работе не была учтена. При всех упрощениях в модели данные, полученные аналитическим методом, дают удовлетворительное сходжение с результатами экспериментальных исследований, полученных в более ранних статьях [38].

Выводы

Для выявления наиболее подходящих режимов обработки циркониевого сплава Э110 было решено исследовать результаты распространения тепла вглубь заготовки при различном времени воздействия. Другими словами, аналитически определить, как влияет различная величина времени длительности импульса на толщину расплавляемого материала и толщину дефектного слоя.

Полученные данные показали, что при меньшем времени импульса толщина расплавляемого материала, а также толщина дефектного слоя уменьшаются. Однако на практике при меньших значениях этого параметра происходит значительное увеличение времени обработки. При времени импульса, равного 1,5 мкс, глубина расплавляемого слоя для циркония составила порядка 13 мкм, а дефектный слой не может залегать глубже 31 мкм от исходной поверхности; при этом для титана данные глубина расплавляемого слоя равна порядка 28 мкм, а дефектный слой не может залегать глубже 53 мкм от исходной поверхности.

При времени импульса, равного 3 мкс, глубина расплавляемого слоя для циркония составила порядка 28 мкм, а дефектный слой не может залегать глубже 62 мкм от исходной поверхности, в то время как для титана глубина расплавляемого слоя равна порядка 85 мкм, а дефектный слой не может залегать глубже 135 мкм от исходной поверхности. Для нахождения рациональных режимов обработки, при которых будет наибольшая скорость обработки и наименьшая толщина дефектного слоя, необходима более сложная математическая модель, которая является целью дальнейших исследований.

Список источников / References

1. Лазаренко Б. Р., Лазаренко Н. И. Электрическая эрозия металлов. В 2 вып. Москва: Госэнергиздат, 1944. 60 с.

- Lazarenko B. R., Lazarenko N. I. *Elektricheskaya eroziya metallov* [Electrical erosion of metals]. Moscow, 1944. Vol. 1-2. P. 60. (In Russ.).
2. Kunieda M., Lauwers B., Rajurkar K. P. [et al.]. Advancing EDM through fundamental insight into the process. *CIRP Annals*. 2005. Vol. 54, no. 2. P. 64–87. DOI: 10.1016/s0007-8506(07)60020-1.
3. Descoeudres A. Characterization of electrical discharge machining plasmas. EPFL. 2006. DOI: 10.5075/epfl-thesis-3542.
4. Joshi S., Pande S. Development of an intelligent process model for EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009. Vol. 45. P. 300–317. DOI: 10.1007/s00170-009-1972-4.
5. Beck J. V. Large time solutions for temperatures in a semi-infinite body with a disk heat source. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1981. Vol. 24, no. 1. P. 155–164.
6. Jilani S. T., Pandey P. C. Analysis and modelling of EDM parameters. *Precision Engineering*. 1982. Vol. 4. P. 215–221.
7. Pandit S. M., Rajurkar K. P. A stochastic approach to thermal modeling applied to electro-discharge machining. *ASME. J. Heat Transfer*. 1983. Vol. 105, no. 3. P. 555–562. DOI: 10.1115/1.3245621.
8. Dijck F., Dutré W. Heat conduction model for the calculation of the volume of molten metal in electric discharges. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2002. Vol. 7. P. 899. DOI: 10.1088/0022-3727/7/6/316.
9. Erden A., Kaftanoglu B. Heat transfer modelling of electric discharge machining. *Proceedings of the Twenty-First International Machine Tool Design and Research Conference*. London, 1981. DOI: 10.1007/978-1-349-05861-7_46.
10. Jilani S. T., Pandey P. C. An analysis of surface erosion in electrical discharge machining. *Wear*. Vol. 84, Issue 3. 1983. P. 275–284. DOI: 10.1016/0043-1648(83)90269-7.
11. Pandey P. C., Jilani S. T. Plasma channel growth and the resolidified layer in EDM. *Precision Engineering*. 1986. Vol. 8. P. 104–110.
12. Beck J. V. Transient temperatures in a semi-infinite cylinder heated by a disk heat source. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1981. Vol. 24. P. 1631–1640.
13. Salah N. B., Ghanem F., Atig K. B. Numerical study of thermal aspects of electric discharge machining process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006. Vol. 46, no. 7-8. P. 908–911. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.04.022.
14. Jithin S., Raut A., Bhandarkar U. P. [et al.]. Finite element model for topography prediction of electrical discharge textured surfaces considering multi-discharge phenomenon. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020. Vol. 177. P. 105604. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105604.
15. Ming W., Zhen Z., Shengyong Y. [et al.]. Investigating the energy distribution of work piece and optimizing process parameters during the EDM of Al6061, Inconel718 and SKD11. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 92. P. 4039–4056. DOI: 10.1007/s00170-017-0488-6.
16. Singh H. Experimental study of distribution of energy during EDM process for utilization in thermal models. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012. Vol. 55, no. 19-20. P. 5053–5064. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.004.
17. Zhang Y., Yonghong L., Yanget S. [et al.]. A novel method of determining energy distribution and plasma diameter of EDM. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 75. P. 425–432. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.082.
18. Li Q., Yang X. Study on arc plasma movement and its effect on crater morphology during single-pulse discharge in EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 106. P. 5033–5047. DOI: 10.1007/s00170-020-04964-0.
19. Ghiculescu D., Marinescu N. I., Nanu S. Modelling aspects of removal mechanism at ultrasonic aided electro discharge machining. *International Journal of Material Forming*. 2009. Vol. 2. P. 685–688. DOI: 10.1007/s12289-009-0586-6.
20. Khatri B. C., Rathod P., Valaki J. B. Ultrasonic vibration – assisted electric discharge machining: A research review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2016. Vol. 230, no. 2. P. 319–330. DOI: 10.1177/0954405415573061.
21. Mansoor S. M. Finite element analysis of magnetic field assisted wire electric discharge machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 402, no. 1. P. 012051. DOI: 10.1088/1757-899X/402/1/012051.
22. Ming W. Comparative study of energy efficiency and environmental impact in magnetic field assisted and conventional electrical discharge machining. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 214. P. 12–28. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.231.
23. Yu L. L. Research on mechanism and application of electrical discharge machining with synchronous servo double electrodes for non-conductive engineering ceramics. China University of Petroleum (East China). 2008. DOI: 10.2991/emeit.2012.280.
24. Yang X., Guo J., Chen X. [et al.]. Molecular dynamics simulation of the material removal mechanism in micro-EDM. *Precision Engineering*. 2011. Vol. 35, no. 1. P. 51–57. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2010.09.005.
25. Yue X., Yang X. Molecular dynamics simulation of machining properties of polycrystalline copper in electrical discharge machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2019. Vol. 233, no. 2. P. 371–380. DOI: 10.1177/0954405417748187.
26. Zhang G., Guo J., Minget W. [et al.]. Study of the machining process of nano-electrical discharge machining based on combined atomistic-continuum modeling method. *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 290. P. 359–367. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.11.084.
27. Yue X., Yang X., Li Q. [et al.]. Novel methods for high-speed observation of material removal and molten pool movement in EDM. *Precision Engineering*. 2020. Vol. 66. P. 295–305. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2020.07.009.
28. Wang J., Han F. Simulation model of debris and bubble movement in consecutive-pulse discharge of electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2014. Vol. 77. P. 56–65. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2013.10.007.
29. Zhu Z., Guo D., Xu J. [et al.]. Processing characteristics of micro electrical discharge machining for surface modification of TiNi shape memory alloys using a TiC powder dielectric. *Micromachines*. 2020. Vol. 11, no. 11. P. 1018. DOI: 10.3390/mi1111018.
30. Ming W., Zhang S., Zhang G. [et al.]. Progress in modeling of electrical discharge machining process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. Vol. 187. P. 122563. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122563.
31. Dibitonto D. D., Eubank P. T., Patel M. R. [et al.]. Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model. *Journal of Applied Physics*. 1989. Vol. 66, no. 9. P. 4095–4103. DOI: 10.1063/1.343994.
32. Eubank P. T., Patel M. R., Barrufet M. A. [et al.]. Theoretical models of the electrical discharge machining process. III. The variable mass, cylindrical plasma model. *Journal of Applied Physics*. 1993. Vol. 73, no. 11. P. 7900–7909. DOI: 10.1063/1.353942.
33. Wang Z. L., Xie B. C., Wang, Y. K. [et al.]. Numerical Simulation of Cathode Erosion in EDM Process. *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 462. P. 109–115. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.462.109.
34. Izquierdo B., Sanchez J., Plaza S. [et al.]. A numerical model of the EDM process considering the effect of multiple discharges. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2009. Vol. 49, no. 3-4. P. 220–229. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2008.11.003.
35. Jithin S., Bhandarkar U. V., Joshi S. S. Multi-spark model for predicting surface roughness of electrical discharge textured

surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 106. P. 3741–3758. DOI: 10.1007/s00170-019-04841-5.

36. Kansal H. K., Singh S., Kumar P. Numerical simulation of powder mixed electric discharge machining (PMEDM) using finite element method. *Mathematical and Computer Modelling*. 2008. Vol. 47, no. 11-12. P. 1217–1237. DOI: 10.1016/j.mcm.2007.05.016.

37. Sundriyal S., Yadav J., Walia R. [et al.]. Thermophysical-based modeling of material removal in powder mixed Near-Dry electric discharge machining. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020. Vol. 29. P. 6550–6569. DOI: 10.1007/s11665-020-05110-3.

38. Бобков Н. В., Федоров А. А., Полонянкин Д. А. [и др.]. Исследование влияния режимов проволочно-вырезной электроэрозионной обработки на морфологию, шероховатость и трещинообразование поверхности тугоплавких металлов // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Т. 6, № 1. С. 148–154. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-1-148-154. EDN: VLXWHK.

Bobkov N. V., Fedorov A. A., Polonyankin D. A. [et al.]. Issledovaniye vliyaniya rezhimov provolочно-vyreznoy elektroerozionnoy obrabotki na morfologiyu, sherokhovatost' i treshchinoobrazovaniye poverkhnosti tugoplavkikh metallov [Investigation of the influence of wedm on morphology, roughness and cracking of surfaces refractory metals]. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2018. Vol. 6, no. 1. P. 148–154. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-1-148-154. EDN: VLXWHK. (In Russ.).

БОБКОВ Николай Владимирович, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 5351-7755

AuthorID (РИНЦ): 819427

ORCID: 0000-0002-5831-282X

AuthorID (SCOPUS): 57194829384

ResearcherID: S-1503-2016

ФЕДОРОВ Алексей Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4626-9660

AuthorID (РИНЦ): 610896

ORCID: 0000-0002-6681-087X

AuthorID (SCOPUS): 57193509299

ResearcherID: A-7188-2014

АРТЕМЕНКО Никита Сергеевич, аспирант, инженер научно-исследовательской части Учебного научно-производственного центра «Современные технологии машиностроения» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4907-4758

Адрес для переписки: dickydick89@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 15.01.2025; одобрена после рецензирования 05.05.2025; принята к публикации 30.05.2025.

BOBKOV Nikolay Vladimirovich, Senior Lecturer at the Mechanical Engineering Technology Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 5351-7755

AuthorID (RSCI): 819427

ORCID: 0000-0002-5831-282X

AuthorID (Scopus): 57194829384

ResearcherID: S-1503-2016

FEDOROV Alexey Arkadyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Mechanical Engineering Technology Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4626-9660

AuthorID (RSCI): 610896

ORCID: 0000-0002-6681-087X

AuthorID (Scopus): 57193509299

ResearcherID: A-7188-2014

ARTEMENKO Nikita Sergeyevich, Postgraduate, Research Engineer at the "Modern Manufacturing Technologies" Research and Production Center, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4907-4758

Correspondence address: dickydick89@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 15.01.2025; approved after reviewing 05.05.2025; accepted for publication 30.05.2025.