

УДК 621.9.048.4

DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-25-30

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР
ВГЛУБЬ ЦИРКОНИЕВОЙ ЗАГОТОВКИ
ПРИ ПРОВОЛОЧНО-ВЫРЕЗНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ**

**STUDY OF TEMPERATURE FIELD PROPAGATION INTO ZIRCONIUM BILLET
DURING WIRE-CUT EDM**

Н. В. Бобков, А. А. Федоров, Ю. О. Бредгауэр, А. В. Линовский
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

N. V. Bobkov, A. A. Fedorov, Yu. O. Bredgauer, A. V. Linovsky
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Аннотация. Моделирование с помощью программного продукта Ansys V.21 позволяет предсказать максимальную глубину формирования различных фаз внутри заготовки во время электроэрозионной обработки. Основными параметрами режимов обработки являются: время длительности импульса (on), время паузы между импульсами (off) и напряжение межэлектродного зазора (sv). При рассмотрении количества тепла передаваемого при единичном разряде, главную роль играет время длительности импульса (on), поэтому в текущем исследовании рассмотрены различные значения данного параметра и показано влияние времени воздействия на глубину распространения тепловых волн. По результатам моделирования установлено, что для ускорения обработки необходимо увеличивать время длительности импульса (on) до максимально возможного значения, однако при этом снижается качество поверхностного слоя и точность выдерживаемых размеров.

Ключевые слова: распределение тепла, математическое моделирование, проволочно-вырезная электроэрозионная обработка, глубина проникновения.

Abstract. Modeling with the Ansys V.21 software allows you to predict the maximum depth of formation of different phases inside the workpiece during EDM. The main parameters of the processing modes are: pulse duration time (on), pause time between pulses (off) and spark gap voltage (sv). When considering the amount of heat transmitted at a single discharge, the main role is played by the pulse duration time (on), therefore, the current study considers different values of this parameter and shows the effect of the exposure time on the depth of propagation of heat waves. Based on the results of modeling, it was found that to speed up processing, it is necessary to increase the pulse duration time (on) to the maximum possible value, but at the same time the quality of the surface layer and the accuracy of the withstand dimensions are reduced.

Keywords: heat distribution, math modeling, wire electrical discharge machining, penetration depth.

I. ВВЕДЕНИЕ

Электроэрозионная обработка различных металлов достаточно широко освещается в научно-технической литературе. В исследовании, проведенном Sharakhovsky L.I. [1], установлена зависимость режимов ЭЭО от теплофизических свойств материала. Главным результатом исследования является выявление зависимости эрозионной стойкости материала от теплопроводности, которая влияет на скорость обработки. Goswami A., и Kumar J. (2014) [2] в своей работе выявили закономерность, исходя из которой, толщина дефектного слоя зависит от энергии и длительности импульса. Более высокое значение времени импульса приводит к большей толщине дефектного слоя. Это указывает на то, что толщина дефектного слоя растет с увеличением пикового тока разряда,

времени протекания импульса, энергии импульса и с уменьшением паузы между импульсами. Для исследований был выбран материал Nimonic 80A (77,05% Ni, 18,39% Cr, 1,92% Ti, 1,05% Al, 0,63% Fe, 0,2% Mn, 0,19% Si) и проволочный латунный электрод диаметром 0,25 мм. Marashi, H. [3] отмечает, что при внедрении в диэлектрическую жидкость различных порошковых диэлектриков, толщина диффузионного слоя становится меньше. Sharma, P. [4] отмечает, что есть склонность к формированию толстого дефектного слоя при высокоэнергетических импульсах и низком напряжении. С помощью энергодисперсионной спектроскопии выявлено присутствие Cu и Zn, которые диффундировали из латунной проволоки. Из-за значительной термической деградации микротвердость поверхностного слоя была изменена на 80 мкм. Haşcalık, A. [5] рассматривая дефектный слой, выделяет в нем 3 основные зоны с учетом микротвердости и микрофотографий всех образцов. Внешняя поверхность – состоящая из шлама, далее – белый слой. Под ним область, которая нагревалась и охлаждалась медленнее. Это создало отожженную область, более мягкую, чем исходный материал.

Присутствие материала электрода-инструмента на поверхности обрабатываемой заготовки после ЭЭО наблюдали многие исследователи. В частности, Fukuzawa Y. и др. (2009) [6] отмечают у образцов из циркониевой керамики различающийся химический состав по 3 зонам поверхностного слоя. В верхней зоне углерод и цинк, в средней цирконий и углерод, а в нижней цирконий и медь. Исследователи Chow C. K. и др. (1998) [7] в своей работе сообщают о высокой степени насыщения углеродом поверхности циркониевого сплава Zr–2,5Nb при его электроэрозионной обработке в углеводородном диэлектрике, что подтверждает гипотезу о миграции в поверхностный слой обрабатываемой детали не только материала электрода-инструмента, но и диэлектрической жидкости. Huang H. и Yan J. (2015) [8] отмечают, что одним из наиболее важных критериев качества электроэрозионной обработки является оценка толщины и фазового состава дефектного слоя, образующегося за счет переноса материала электрода и продуктов разложения диэлектрической среды, в поверхностный слой изделий. Lee B. E. J. и др. (2016) [9] отмечают, что улучшить биосовместимость протезов, изготовленных с помощью электроэрозионной обработки, можно путем замены латунного электрода-инструмента на электрод из такого же металла, что и деталь. Такой эффект будет наблюдаться из-за того, что в поверхностный слой не диффундируют частицы инородного материала. В работе Saxena, K. [10] отмечается, что небольшое изменение состава наблюдается между необработанной и обработанной поверхностью из-за образования оксидного и углеродного слоев. Высокое увеличение изображений полученных с помощью растрового электронного микроскопа и имитационное исследование прояснили механизм удаления материала, который должен плавиться и испаряться из-за интенсивного локализованного нагрева. Комбинация РЭМ и рентгеноспектрального анализа показала, что миграция материала является двунаправленной. Для определения процентного содержания меди и цинка в поверхностном слое заготовки, используются два основных метода ЭДС и РФА. Для моделирования процесса теплообмена ученые рассматривают несколько основных вариантов представления источников тепла: дисковые [11–13], точечные [14] и гауссовы [15]. Наиболее популярными считаются цилиндрические, однако наиболее перспективными выглядят стационарные модели нагрева, использующие источники тепла с гауссовым распределением. Модели с гауссовым распределением являются высоко затратными со стороны компьютерных составляющих, однако более точны.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как видно из литературного обзора, моделированию процессов, происходящих во время электроэрозионной обработки, уделено большое внимание со стороны различных исследовательских коллективов 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 так же различных фазовых превращений и трещинообразования. Однако экспериментальное исследование качества поверхностного слоя требует больших затрат материальных ресурсов и дорогостоящих материалов, что актуализирует компьютерное моделирование, как малозатратный инструмент для предсказания фазовых превращений по глубине поверхностного слоя циркониевой заготовки. Целью теоретических исследований, является расчёт глубины распространения полей температур, способных влиять на образование различных фаз (более 600°C) в поверхностном слое циркониевой заготовки.

III. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Исследование посвящено аналитическому прогнозированию глубины фазовых превращений в поверхностном слое циркониевой заготовки, с помощью программного продукта Ansys V.21.

Расчет глубины распространения тепловых волн выполнялся в программном продукте Ansys V.21. Ограничения, сформулированные для проведения исследования:

1. Тело заготовки представлено кубом $5 \times 5 \times 5$ мм.
2. Диэлектрическая жидкость задается как дистиллированная вода, которая имеет постоянную температуру 20°C и взаимодействует с другими телами за счет конвекции.
3. Электрод инструмент представлен цилиндрическим телом из латуни, диаметром 0.2 мм и длиной 5 мм.
4. Электрический разряд, проходящий от электрода-инструмента к циркониевой заготовке представлен твердым телом, которое мгновенно нагревается до температуры 5000°C и держит температуру в течении 1–3 мкс, после чего остывает до температуры диэлектрической жидкости.
5. Передача тепла происходит за счет прямого контакта разряда с поверхностью заготовки, с помощью конвекции и с помощью излучения.

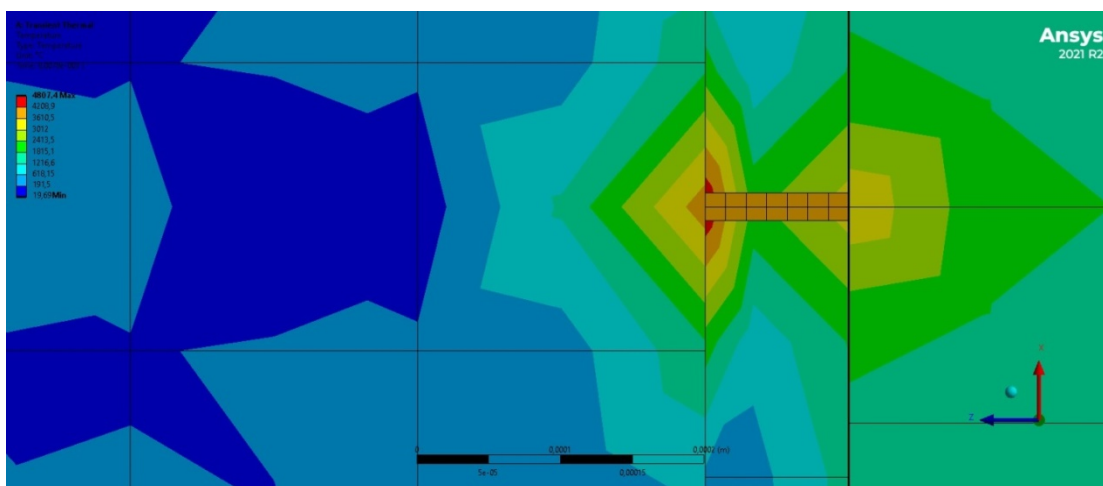


Рис. 1. Визуализация распространения полей температур, соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при стандартном значении параметра «on», равного 2.5 мкс

Полученные результаты расчетов, отражены на рисунках 1-5, где в разрезе оранжевым цветом отмечено нагретое до 5000°C тело (имитирующее разряд), справа от него электрод-инструмент, слева – заготовка. Благодаря полученному расчету, можно судить о распространении полей температур в поверхностных слоях заготовки в момент пробоя. Данный расчет показывает, что температура необходимая для плавления циркония (2125°C) не распространяется на глубину более 25 мкм, при стандартных режимах обработки (on – 2.5 мкс, off – 11 мкс и sv от 55 В). Так же из расчета следует, что дефектный слой не может залегать глубже 20-25 мкм от поверхности не расплавленного материала или 45–50 мкм от исходной поверхности. Температуры, способные влиять на образование различных фаз (600°C), внутри заготовки из циркониевого сплава, не распространяются на глубину более 150 мкм от исходной поверхности, следовательно, фазовые превращения будут наблюдаться на глубине не более 150 мкм от исходной поверхности. Полученные аналитическим методом данные дают удовлетворительное совпадение с результатами экспериментальных исследований, полученных авторами ранее.

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

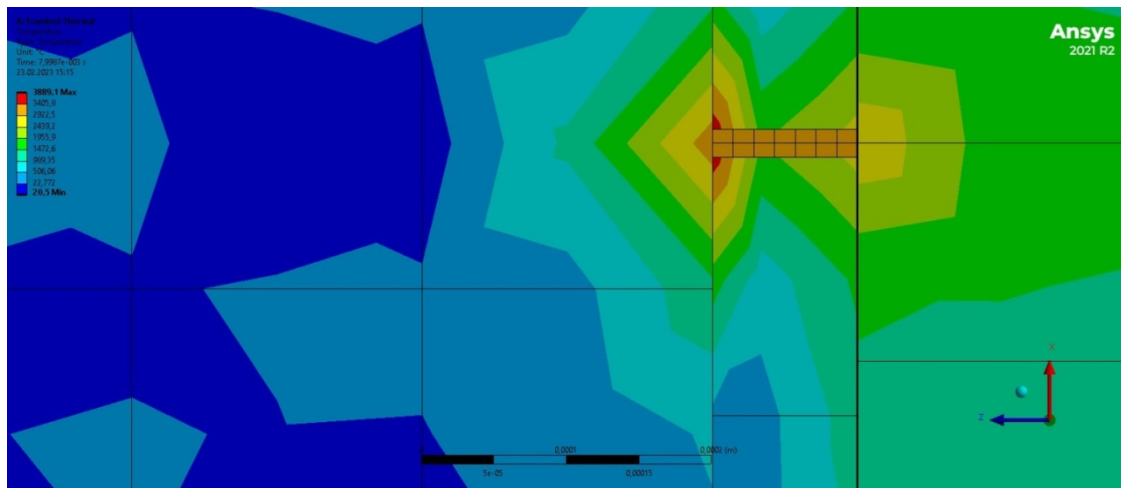


Рис. 2. Визуализация распространения полей температур, соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «оп» равного 1 мкс

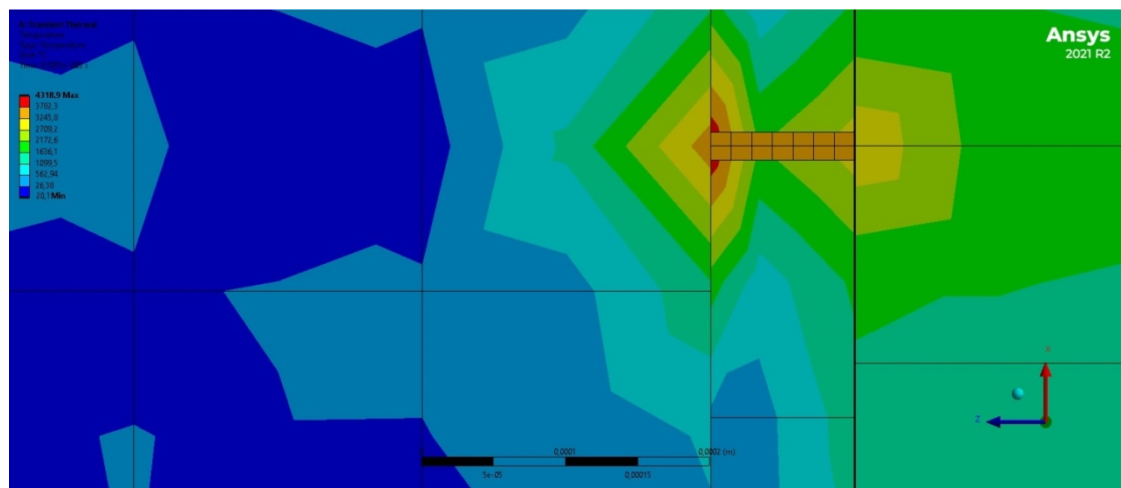


Рис. 3. Визуализация распространения полей температур, соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «оп» равного 1.5 мкс

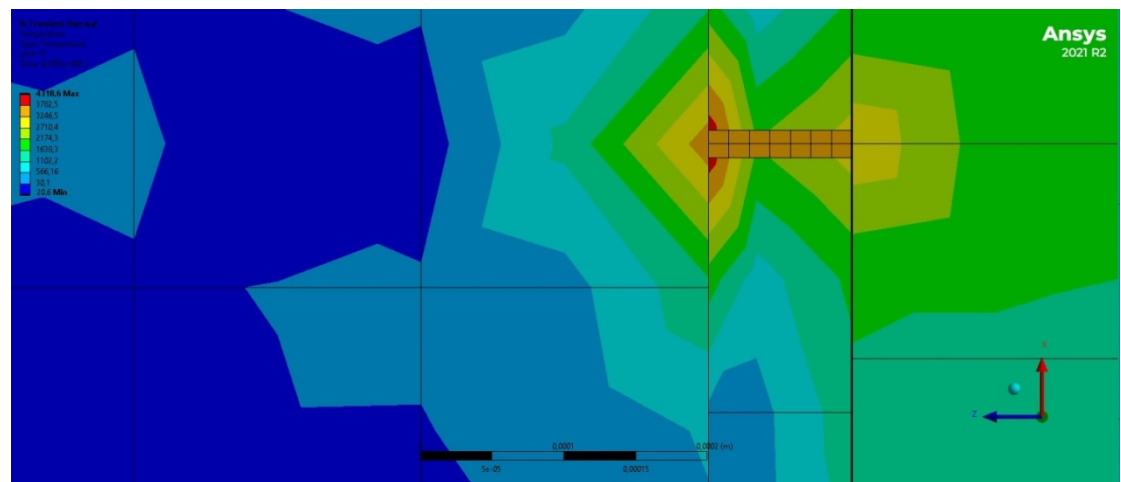


Рис. 4. Визуализация распространения полей температур, соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «оп» равного 2.0 мкс

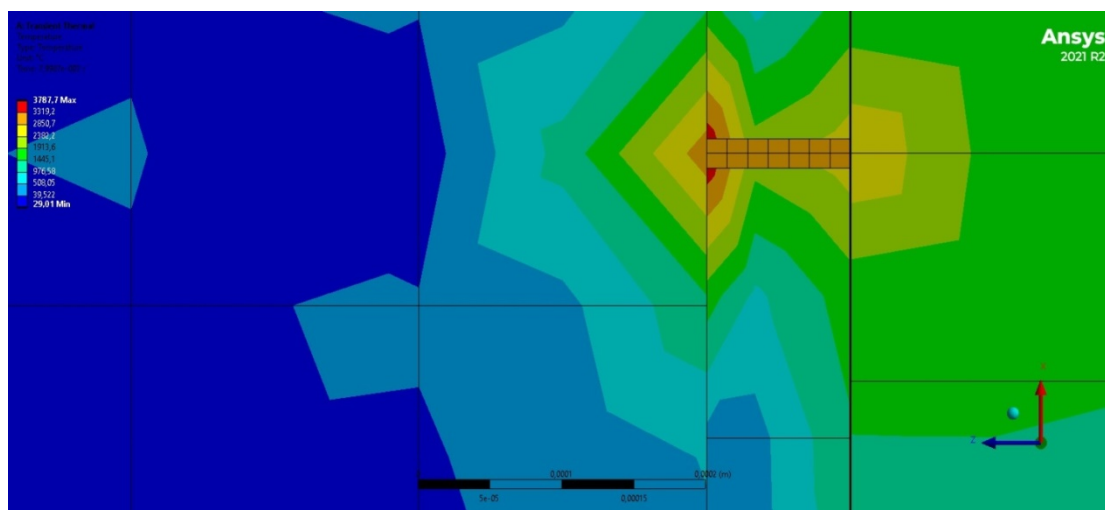


Рис. 5. Визуализация распространения полей температур, соответствующего значения в поверхностных слоях заготовки при значении параметра «on» равного 3 мкс.

IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из полученных аналитическим методом данных (Рис. 1–5) видно, что при меньшем времени импульса толщина расплавляемого материала, а также толщина дефектного слоя уменьшаются. Однако, как известно, при меньших значениях этого параметра происходит значительное увеличение времени обработки. При времени импульса, равного 1 мкс, глубина расплавляемого слоя составила порядка 13 мкм, а дефектный слой не может залегать глубже 31 мкм от исходной поверхности. При времени импульса, равного 3 мкс, глубина расплавляемого слоя составила порядка 28 мкм, а дефектный слой не может залегать глубже 62 мкм от исходной поверхности.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При рассмотрении количества тепла передаваемого при единичном разряде, главную роль играет время длительности импульса (on). Данный параметр изменялся в пределах от 1 мкс до 3 мкс, при этом глубина расплавленного слоя составила от 13 мкм до 28 мкм, а глубина дефектного слоя т 31 мкм до 62 мкм. Следует отметить, что с увеличением времени длительности импульса время обработки уменьшается, так как расплавляется больший объем металла, однако снижение времени длительности импульса позволяет улучшить качество обработки. Наиболее оптимальным временем длительности импульса можно считать его значение в 2.5 мкс, при котором температура необходимая для плавления циркония (2125°C) не распространяется на глубину более 25 мкм, а дефектный слой не может залегать глубже 20–25 мкм от поверхности не расплавленного материала или 45–50 мкм от исходной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sharakhovsky L. I., Marotta A., Essiptchouk A. M. Model of workpiece erosion for electrical discharge machining process // Applied Surface Science. 2006. Vol. 253. Pp. 797–804. DOI: 10.1016/j.apsusc.2006.01.013.
2. Goswami A., Kumar J. Investigation of surface integrity, material removal rate and wire wear ratio for WEDM of Nimonic 80A alloy using GRA and Taguchi method // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2014. Vol. 17, is. 4. Pp. 173–184. DOI: 10.1016/j.jestch.2014.05.002.
3. Marashi H., Jafarlou D. M., Sarahan, A. A. D., Mardi N. A. Employing severe plastic deformation to the processing of electrical discharge machining electrodes // Precision Engineering. 2016. Vol. 46. Pp. 309–322. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2016.05.012.
4. Sharma P., Chakradhar D., Narendranath S. Evaluation of WEDM performance characteristics of Inconel 706 for turbine disk application // Materials and Design. 2015. Vol. 88. Pp. 558–566. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.09.036.

5. Haşçalýk A., Çaydaş, U. Experimental study of wire electrical discharge machining of AISI D5 tool steel // *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. Vol. 148, is. 3. Pp. 362–367. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.02.048.
6. Fukuzawa Y., Mohri N., Gotoh H., Tani, T. Three-dimensional machining of insulating ceramics materials with electrical discharge machining // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2009. Vol. 19. Pp. 150–156. DOI: 10.1016/S1003-6326(10)60263-4.
7. Chow C. K., Brady G. R., Urbanic V. F., Coleman C. E. Hydrogen ingress through EDM surfaces of Zr-2.5Nb pressure-tube material // *Journal of Nuclear Materials*. 1998. Vol. 257, is.1. Pp. 35–43. DOI: 10.1016/S0022-3115(98)00436-X.
8. Huang H., Yan J. Applied Surface Science On the surface characteristics of a Zr-based bulk metallic glass processed by microelectrical discharge machining // *Applied Surface Science*. 2015. Vol. 355. Pp. 1306–1315. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.08.239.
9. Lee, B. E. J., Ho, S., Mestres, G., Karlsson, M., Koshy, P., & Grand, K. (2016). Surface & Coatings Technology Dual-topography electrical discharge machining of titanium to improve biocompatibility, 296, 149–156. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.04.024.
10. Saxena K. K., Agarwal S., Khare S. K. Surface Characterization, Material Removal Mechanism and Material Migration Study of Micro EDM Process on Conductive SiC // *Procedia CIRP*. 2016. Vol. Pp. 179–184. DOI:10.1016/j.procir.2016.02.267.
11. J. Beck. 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, is. 1. Pp. 155–164. DOI: 10.1016/0017-9310(81)90104-6.
12. S. Jilani P. Pandey. Analysis and modelling of edm parameters // *Precis. Eng.* 1982. Vol. 4, is. 4. Pp. 215–221. DOI: 10.1016/0141-6359(82)90011-3.
13. Snoeys R., VanDijck F. Investigation of electro discharge machining operations by means of thermo-mathematical model // *CIRP. Ann.* 1971. Vol. 20, is. 1. Pp. 35–37.
14. A. Erden B. Kaftanoglu. Heat transfer modelling of electric discharge machining. 1981. Pp. 351–358. DOI: 10.1007/978-1-349-05861-7-46.
15. N. Salah, K. Ghanem F., Kaïs Ben Atig. Numerical study of thermal aspects of electric discharge machining process // *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2006. Vol. 46, is. 7–8. Pp. 908–911. DOI:10.1016/j.ijmachtools.2005.04.022.