УДК 621.9.048.4
DOI: 10.25206/2310-4597-2023-1-31-37

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ТЕЧЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ В ПРОЦЕССЕ ПРОВОЛОЧНО-ВЫРЕЗНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

MODELING OF DIELECTRIC FLUID FLOW FIELDS DURING WIRE-CUT ELECTRIC EROSION TREATMENT

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

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

Аннотация. Электроэрозионная обработка является высокотехнологичным методом обработки изделий, изготовленных из любых токопроводящих материалов, способным достичь высокого качества и точности поверхности. Однако обрывы проволоки резко снижают ее производительность. В статье рассмотрены гипотезы причин обрыва проволоки. Проведены исследования, позволяющие определить место рециркуляции потоков диэлектрической жидкости. Предполагается, что именно в зоне рециркуляции потоков образуются эффективные частицы и мостики сварки из них.

***Ключевые слова*:** обрыв проволоки, условия прокачки, проволочно-вырезная электроэрозионная обработка, мостик сварки

Abstract. EDM is a high-tech method of processing products made from any conductive materials, capable of achieving high quality and surface accuracy. However, wire breakages drastically reduce its performance. The article discusses the hypotheses of the causes of wire breakage. Studies have been carried out to determine the place of recirculation of dielectric fluid flows. It is assumed that it is in the flow recirculation zone that effective particles and welding bridges are formed from them.

***Keyword*:** wire breakage, flow conditions, wire electrical discharge machining, welding bridge.

I. Введение

Технические характеристики современных машин постоянно совершенствуются, что способствует развитию существующих и созданию новых методов обработки, которые основываются на различных электрофизических или электрохимических явлениях. В 1943 году Б.Р. и Н.И. Лазаренко [1] был разработан метод удаления припуска с поверхности, основанный на явлении электрической эрозии. Так было положено начало развития электроэрозионной обработки. Последние 40-50 лет электроэрозионная обработка получила широкое распространение, многие ученые объясняют это увеличением количества трудно обрабатываемых материалов и сплавов, используемых в производстве. Технология электроэрозионной обработки занимает особое место при изготовлении штампов и пресс-форм.

Однако явление пробоя в узком зазоре при электроэрозионной обработке сложно для прямого наблюдения и, следовательно, еще не до конца изучено [2]. Внесение точности в процесс возникновения дуговых разрядов даже при стабильных режимах обработки продолжает оставаться сложной задачей. Явление электрического разряда в электроэрозионной обработке происходят в течение очень короткого периода времени в узком зазоре, заполненном диэлектрической жидкостью, и включает в себя процессы плавления и испарения электродов, что делает чрезвычайно трудным как его наблюдение, так и теоретический анализ.

Основное преимущество электроэрозионной обработки – обработка токопроводящих материалов с высокой твердостью без деформации тонкостенных и маложестких деталей. Однако, повышение производительности процесса до сих пор является актуальной задачей [3, 4, 5].

Одним из основных факторов, снижающих производительность проволочно-вырезной электроэрозионной обработки (ПЭЭО), являются обрывы проволоки. В настоящее время можно выделить три основных направления в изучении обрывов электрода-инструмента, описывающих причины обрывов: 1) тепловое воздействие; 2) механическое воздействие; 3) короткое замыкание между электродами.

Под тепловым воздействием понимают разрушение электрода-инструмента под воздействием высоких температур, возникающих при пробое межискрового промежутка. Локальный перегрев проволоки может произойти при концентрации разряда в одном месте [6]. Позднее было установлено, что максимальная температура латунного провода во время обработки не превышает 100°C, что значительно меньше, чем температура плавления материала проволоки [7]. Группы ученных, в разное время занимавшихся исследованием явление обрыва, обнаружили, что шлам, образовывающийся при удалении материала с поверхности заготовки, скапливается на границе газовых пузырьков, возникающих при испарении диэлектрика под воздействием высоких температур электрического пробоя, может вызвать концентрацию разрядов в области скопления частиц шлама [7, 8, 9]. Однако в современном оборудовании проблема локальной концентрации разрядов решена с помощью системы контроля и мониторинга состояния межэлектродного промежутка [10].

Обрыв проволоки вследствие воздействия механического напряжения так и не был подтвержден. Было проведено исследование, которое доказало, что сумма термомеханических напряжений (растягивающее усилие проволоки – 23.34 Н, включая максимальные термические напряжения – 7.34 Н и усилие натяжных роликов – 16 Н) не способна вызвать обрыв проволоки [4], так как прочность на разрыв эродированной проволоки составляет 39.1 Н.

Короткое замыкание является наиболее вероятной гипотезой обрыва проволоки, что подтверждается исследованиями [11, 12, 13]. Но оно возможно только при выполнении одного из условий: 1) непосредственный контакт проволоки и заготовки; 2) наличие между электродами проводника. Первое условие имеет слишком низкую вероятность возникновения, так как системы контроля и мониторинга постоянно отслеживают расстояние межискрового промежутка [11, 12, 13]. Выполнения условия наличия проводника между электродами более вероятно. Проводником может служить шлам, который является токопроводящим [14].

Образование шлама – процесс, который является неотъемлемой частью электроэрозионной обработки. Сотни частиц шлама образуются только за один импульс тока. При прокачке диэлектрической жидкости через межэлектродный промежуток шлам находится между проволочным электродом и заготовкой. Частицы имеют разнообразную форму и размеры [15], поэтому при недостаточных условиях промывки межэлектродного промежутка, могут застревать между электродами, образовывая, так называемый, «мостик сварки» [14, 15, 16].

«Мостик сварки», состоящий из частиц шлама, вызывает короткое замыкание, и, как следствие, обрыв проволоки. Не все частицы способны образовывать «мостик сварки». Их можно разделить на «эффективные» и «неэффективные» [16]. Механизмы образования эффективных частиц не исследовались подробно. Поэтому моделирование условий промывки межэлектродного промежутка является актуальной задачей. Исследователи проводили моделирование условий прокачки и выяснили, что давление жидкости приводит к вибрации проволоки и обрывы проволоки случаются чаще именно при врезе в материал заготовки (т. н. «стартовый врез» – до 2–3 мм), так как условия промывки ухудшаются [17]. Так же с помощью моделирования было обнаружено, что удаляемые частицы могут сталкиваться в зазоре при встрече потоков с верхнего и нижнего сопла [18]. В исследовании не дается пояснение, на каком участке рабочего промежутка это может происходить, однако это важно для понимания места образования «мостика сварки».

II. Постановка задачи

Для улучшения понимания механизма обрыва проволоки при ПЭЭО необходимо определить место обрыва проволоки по высоте реза. Для этого необходимо провести исследование обработанной поверхности и моделирование условий прокачки при ПЭЭО.

III. Экспериментальные исследования и аппаратура

1. Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка образцов

В качестве заготовок были использованы образцы в форме параллелепипеда с размерами 50×50×150 (Д×Ш×В) мм. Материал образцов – конструкционная легированная сталь 40ХГНМ. В качестве электрода-

инструмента использовалась жесткая латунная проволока со следующим процентным содержанием: 60% меди и 40% цинка. Диаметр проволоки – 0.25 мм. Обработка производилась на проволочном электроэрозионном станке Sodick VZ300L (Япония). В качестве рабочей диэлектрической жидкости использовалась дистиллированная вода. В ходе эксперимента положение сопел менялось в зависимости от выбранного режима (рис. 1):

1) OPEN – режим, в котором оба сопла станка находятся на расстоянии более 0.1 мм от заготовки (данный режим используется для изделий, имеющих различную толщину реза или при обработке в специальных приспособлениях, не позволяющих приблизить сопла к поверхности заготовки);

2) OPEN U – режим, в котором одно из сопел станка (верхнее или нижнее) находится на расстоянии от заготовки более 0.1 мм, а другое – на расстоянии равном 0.1 мм;

3) CLOSE – режим, в котором оба сопла станка находятся от заготовки на расстоянии равном 0.1 мм.

Текущие значения электрических параметров (тока и напряжения), которые были автоматически рассчитаны программным обеспечением станка, во время экспериментов не изменялось вручную и фиксировалось при помощи встроенных вольтметра и амперметра. Сила тока имела среднее значение в 10.5 А, при этом она колебалась в диапазоне от 10.4 до 10.6 А, а среднее значение напряжения было 40 В, при этом диапазон составил от 38 до 42 В.

На рис. 2 представлены образцы поверхности детали после ПЭЭО при различных положениях сопел (рис. 1).

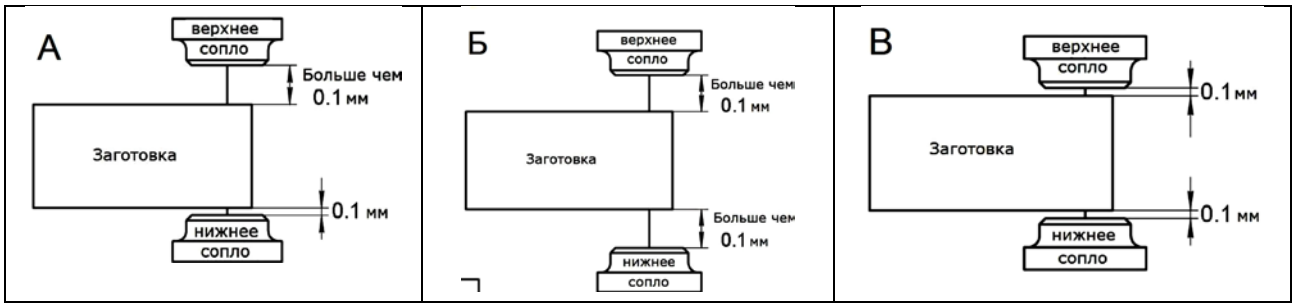


Рис. 1. Схема расположения сопел в процессе электроэрозионной обработки:
А) OPEN U; Б) OPEN; В) CLOSE

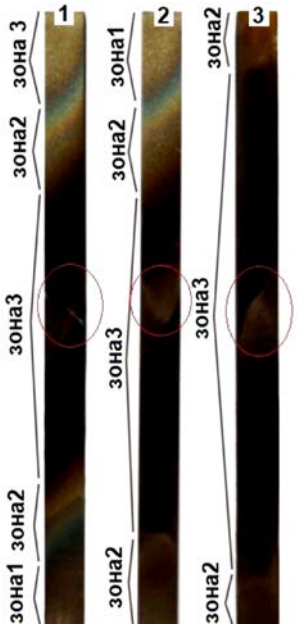


Рис. 2. Поверхности, обработанные с помощью проволочной
электроэрозионной обработки при различных положениях сопел:
1) CLOSE; 2) OPEN U; 3) OPEN

2. 3D моделирование потоков диэлектрической жидкости при ПЭЭО

Моделирование условий прокачки при проволочной электроэрозионной обработке осуществлялось с помощью программного обеспечения SolidWorks Flow Simulation. (CFD-анализ).

Исходными данными для проектирования являлись размеры обрабатываемой заготовки, форма электрода-инструмента, его размер и оставляемый им след при обработке, ширина межэлектродного промежутка (рис. 3 параметр r) – 50 мкм, диаметр сопел – 6 мм. Расстояние от заготовки до сопла варьировалось в зависимости от режима обработки (рис. 1). Давление жидкости было пересчитано на скорость по следующим формулам:

Объемный расход сопел равен W=6 л/мин или 0.1 л/с

$$\frac{dp}{dt} = F = S, \text{ где } p = mV \tag{1}$$

$$F = m\left(\frac{dV}{dt}\right) = \frac{d(mV)}{dt} \tag{2}$$

$$F = pS = -\eta \frac{dV}{dr} dS \tag{3}$$

Так как в левой и правой части уравнения содержится S, то можно умножить равенство на S

$$pdr = -\eta dV \tag{4}$$

$$V = -\frac{1}{\eta} \int_{r1}^{r} Pdr \tag{5}$$

По выведенной формуле 1 скорость диэлектрической жидкости на выходе составила 75 м/с.

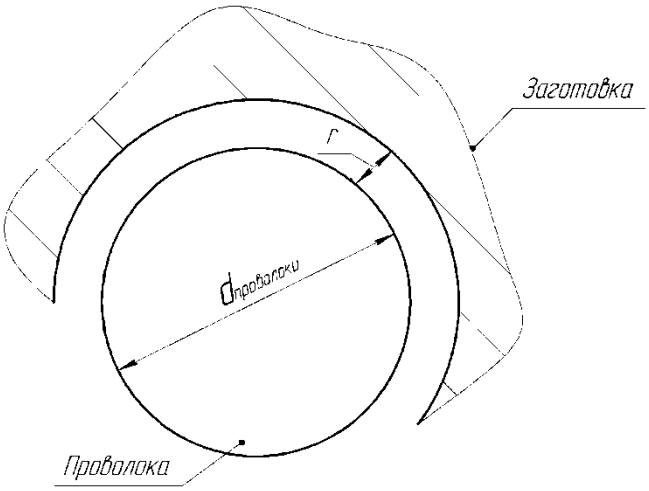


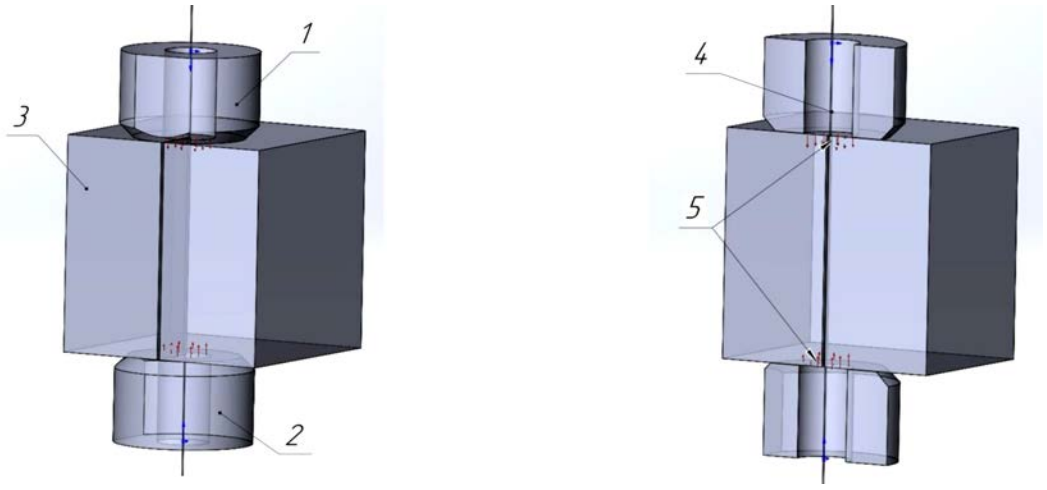
Рис. 3. Схематическое положение проволочного электрода-инструмента и заготовки при проволочно-вырезной электроэрозионной обработке

На рисунке 4 представлена модель, подготовленная с помощью программного обеспечения SolidWorks Flow Simulation. Модель включает в себя сопло верхнее (рис. 4, поз. 1) и сопло нижнее (рис. 4, поз. 2), обрабатываемую деталь (рис. 4, поз. 3) и проволочный электрод-инструмент (рис. 4, поз. 4). Позиция 5 на рисунке 4 указывает потоки диэлектрической жидкости, вырывающиеся из верхнего и нижнего сопла на встречу друг другу. Они являлись граничными условиями при моделировании. Скорость потока равна 75 м/с. Таким образом, обеспечивается промывка межэлектродного промежутка, в котором находится проволока. Во время обработки сопла неподвижны, и обработка по контуру обеспечивается движением стола, заданным по программе, проволока постоянно проматывается через рабочую зону со скоростью 13 м/с. Однако этими перемещениями при моделировании пренебрегали для упрощения модели, так как они не существенно влияют на прокачку жидкости во время обработки.

Опыт работы авторов на электроэрозионном оборудовании в качестве операторов станка показывает, что обрывы проволоки чаще возникают в режиме OPEN. Они возникают из-за сложных условий прокачки диэлектрической жидкости на большую глубину, отклонений потока прокачки из-за геометрии детали и элементов

приспособлений и других факторов. Перечисленные факторы сложно прогнозируемы и зависят от конкретных параметров настройки станка. Поэтому для моделирования в представленном исследовании был выбран режим CLOSE, при котором сопла удалены на 0.1 мм от детали с обеих сторон и влияние внешних факторов сведено к минимуму, а производительность обработки деталей максимальна.

Так же исходными данными для моделирования являлась рабочая жидкость. В библиотеке ПО SolidWorks Flow Simulation была выбрана диэлектрическая жидкость – Water, плотность которой соответствует 997 кг/м³.



А) Б)

Рис. 4. Спроектированная модель в ПО SolidWorks Flow Simulation:
А) общий вид: 1 – верхнее сопло; 2 – нижнее сопло; 3 – обрабатываемая деталь;
Б) в сечении: 4 – проволочный электрод-инструмент; 5 – направление потоков диэлектрической жидкости

Результаты моделирования представлены на рисунке 5. Направление потоков жидкости обозначены стрелками.

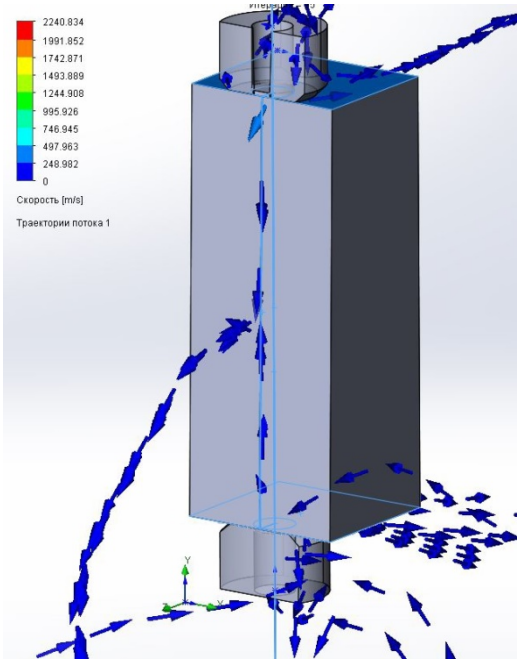


Рис. 5. Результаты моделирования потоков жидкости при ПЭЭО
в ПО SolidWorks Flow Simulation

IV. Обсуждение результатов

При электроэрозионной обработке материал оплавляется под действием импульсов электрического тока. При пробое межэлектродного промежутка из-за высоких температур рабочая среда испаряется, тем самым, образовывая, так называемый, газовый пузырь. Под действием давления внешней среды и газового пузыря, расплавленный материал выплескивается частями, направления движений которых весьма разнообразны.

Так, часть материала может двигаться перпендикулярно поверхности обработки, проходя при этом через газовый пузырь. Существуют исследования, в которых утверждается, что расплав материала проходит через пузырь, попадая в диэлектрическую среду, металл охлаждается, застывая в сферической форме под воздействием сил поверхностного натяжения [19]. Другая часть расплавленного материала может двигаться совершенно иначе – не перпендикулярно обработанной поверхности, а под углом.

При взрыве газового пузыря расплавленный металл попадает в рабочую среду. Так как вода постоянно прокачивается через межэлектродный промежуток, то шлам вымывается из зоны обработки. Спроектированная CFD модель процесса удаления мусора из межискрового промежутка, основывается на предположении о том, что частицы мусора переносятся потоками диэлектрической жидкости [20]. Удаление материала из зоны обработки происходит постоянно, поэтому при вымывании частиц может произойти их столкновение.

Три стальных образца были обработаны при одинаковых параметрах процесса, но на разных режимах обработки. При исследовании полученных продольных поверхностей образцов было обнаружено, что каждую поверхность можно условно разделить на 3 зоны (рис. 2): зона 1 – зона хороших условий промывки, характеризуется светлым металлическим оттенком, зона 2 – средние условия промывки, характеризуется более темных цветом, что говорит о большем количестве налипшего шлама, и зона 3 – зона плохих условий промывки шлама, характеризуется темным цветом, который указывает на то, что в этой зоне большое количество «пригоревшего» шлама. Эти зоны хорошо согласуются с условиями промывки при различных режимах, так в режиме CLOSE сопла приближены на 0.1 мм к заготовке, давление струи хорошо вымывает шлам в верхней и нижней частях, но по мере удаления от сопла, поверхность становится более темной.

Однако на всех трех образцах в середине можно обнаружить более светлые полосы, которые обведены на рисунке 2 красными окружностями. Эти светлые участки могут свидетельствовать о наличии зоны рециркуляционного потока, который образуется при встрече верхнего и нижнего потоков. Это подтверждается исследованиями, приведенными в литературном обзоре. Китайские ученные при моделировании процесса ПЭЭО обнаружили рециркуляционный поток, который образуется примерно в середине реза за проволокой при столкновении нижнего и верхнего потоков [21]. Так же исследования, подтверждающие столкновение потоков в середине реза, доказывают это и на эксперименте [16].

Результаты моделирования с помощью ПО SolidWorks Flow Simulation представлены на рисунке 5. Направление движения диэлектрической жидкости при промывке обозначено стрелками. Распределение потока происходит по заготовке, при этом часть потока разбивается по верхней и нижней поверхностям заготовки, находящихся у верхнего и нижнего сопел соответственно. Это можно объяснить тем, что струя потока жидкости не попадает в межэлектродный промежуток, так как диаметр сопла равен 6 мм, а межэлектродный промежуток составляет 50 мкм. Потоки диэлектрической жидкости, попавшие в рабочую зону, встречаются примерно в середине продольного реза, а после выходят из зоны обработки. Эти результаты хорошо согласуются с результатами, полученными при исследовании обработанной поверхности. Зона, обозначенная красной окружностью на рисунке 2, также находится в середине реза, именно там встречаются нижний и верхний потоки. Можно предположить, что рециркуляционный поток на модели так же может присутствовать, но так как он имеет небольшую величину относительно размеров заготовки, он может быть не отображен при моделировании.

Все эти результаты говорят о том, что образование эффективных частиц шлама наиболее вероятно именно в зоне рециркуляции, так как потоки диэлектрика могут сталкивать частицы между собой, что будет приводить к образованию более крупных частиц, способных перекрыть межискровой промежуток, тем самым вызвав короткое замыкание и обрыв проволоки.

VI. Выводы и заключение

По результатам работы было выполнено 3D моделирование потоков диэлектрической жидкости при ПЭЭО и экспериментальное исследование поверхности, прошедшей ПЭЭО при различных режимах. Было об-

наружено, что потоки диэлектрической жидкости встречаются примерно в середине реза. Это подтверждается экспериментальными данными и результатами моделирования. Предполагается, что именно в этой зоне большая вероятность образования эффективных частиц, которые способны образовать «мостик сварки».

В дальнейшем планируется провести моделирование для режимов OPEN и OPEN U, а так же подробнее описать механизм образования мостика сварки при ПЭЭО.

Список литературы

1. Lazarenko B. R. To invert the effect of wear on electric power contacts // Diss. All-Union Inst. Electro Tech. Moscow / USSR. 1943.

2. Habib S., Okada A. Study on the movement of wire electrode during fi-ne wire electrical discharge machining process // Journal of Materials Processing Technology. 2016. Vol. 227. Pp. 147–152.

3. Wang J., Sánchez J.A., Izquierdo B. [et al.]. Effect of discharge accumulation on wire breakage in WEDM process // Int J Adv Manuf Technol. 2023. Vol. 125. Pp. 1343–1353. DOI: 10.1007/s00170-022-10786-z.

4. Fedorov A. A., Linovsky A. V., Blesman A. I. [et al.]. Investigation of the impact of Rehbinder effect, electrical erosion and wire tension on wire breakages during WEDM // Journal of Materials Processing Technology. 2018. Vol. 256. Pp. 131–144. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.02.002.

5. Xu Y., Guo X. H., Liu C. Study on wire breakage in WEDM by 3D technology //Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2011. Vol. 44. Pp. 1442–1448.

6. Obara H. Detection of Discharging Position in Wire EDM // Proc. Of ISEM-10. 1992. Pp. 404–409.

7. Obara H. An attempt to detect wire temperature distribution during wire EDM // Proc. Of ISEM-11. 1995. P. 67.

8. Kunieda M. [et al.]. Advancing EDM through fundamental insight into the process // CIRP annals. 2005. Vol. 54, no. 2. Pp. 64–87.

9. Dekeyser W., Snoeys R., Jennes M. A thermal model to investigate the wire rupture phenomenon for improving performance in EDM wire cutting // Journal of Manufacturing Systems. 1985. Vol. 4, no. 2. Pp. 179–190.

10. Shoda K. Adaptive Control of Wire EDM with On-line Detection of Spark Locations // Proc. of 10 th Int. Symp. of Electro-Machining. 1992. Pp. 410–416.

11. Obara H., Abe M., Ohsumy T. Control of Wire Breakage during Wire EDM-1st Report: Monitoring of Gap Signals According to Discharged Location // International Journal of Electrical Machining. 1999. Vol. 4. Pp. 53–58.

12. Rajurkar K. P., Wang W. M., Lindsay R. P. On-line monitor and control for wire breakage in WEDM // CIRP annals. 1991. Vol. 40. № 1. Pp. 219–222.

13. Fu X. et al. MRR analysis on technology of piezoelectric self-adaptive micro-EDM // Procedia Engineering. 2011. Vol. 16. Pp. 477–485.

14. Bommeli B., Frei C., Ratajski A. On the influence of mechanical perturbation on the breakdown of a liquid dielectric // Journal of electrostatics. 1979. Vol. 7. Pp. 123–144.

15. Li D. Study on the Movement Rule of Discharge Products in Large Area Titanium Alloy Machining by Electrical Discharge Machining // Journal of Mechanical Engineering. 2017. Vol. 53, no. 200. Pp. 10.3901.

16. Fedorov A. A. [et al.]. Investigation of welding bridge occurrence and short circuit impact on wire breakages during WEDM // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1210, no. 1. Pp. 012045.

17. Okada A. [et al.]. Wire breakage and deflection caused by nozzle jet flushing in wire EDM // CIRP annals. 2015. Vol. 64, no. 1. Pp. 233–236.

18. Yue X., Yang X. Study on the distribution of removal material of EDM in deionized water and gas with molecular dynamics simulation // Procedia CIRP. 2016. Vol. 42. Pp. 691–696.

19. Hockenberry T. O., Williams E. M. Dynamic evolution of events ac-companying the low-voltage discharges employed in EDM // IEEE Transactions on Industry and General Applications. 1967. No. 4. Pp. 302–309.

20. Tanjilul M. [et al.]. A study on EDM debris particle size and flushing mechanism for efficient debris removal in EDM-drilling of Inconel 718 // Journal of Materials Processing Technology. 2018. Vol. 255. Pp. 263–274.

21. Okada A. [et al.]. Wire breakage and deflection caused by nozzle jet flushing in wire EDM // CIRP Annals. 2015. Vol. 64. No. 1. Pp. 233–236.