



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Обеспечение точности проволочно-вырезной электроэрозионной обработки изделий, выполненных из труднообрабатываемых материалов

Евгений Шлыков^{a, *}, Тимур Абляз^b, Карим Муратов^c

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский проспект 29, г. Пермь, 614990, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0001-8076-0509>, Kruspert@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6607-4692>, lowrider11-13-11@mail.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0001-7612-8025>, Karimur_80@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.1.9

История статьи:

Поступила: 29 апреля 2020
 Рецензирование: 13 мая 2020
 Принята к печати: 02 июня 2020
 Доступно онлайн: 15 сентября 2020

Ключевые слова:

Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка
 Режимы обработки
 Электрод-инструмент
 Точность обработки

Финансирование:

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию FSNM-2020-0028.

АННОТАЦИЯ

Введение. С целью повышения эксплуатационных свойств выпускаемой номенклатуры изделий в машиностроении используются материалы, имеющие повышенные физико-механические свойства. Применение таких материалов позволяет изготавливать изделия малых габаритов, но обладающих высокими функциональными возможностями. При обработке таких материалов происходит значительный износ режущего инструмента, а при обработке изделий сложного профиля необходимо применять дополнительную оснастку. Данные факторы увеличивают себестоимость изготовления годных изделий. Для обработки таких изделий целесообразно применять электрофизические методы обработки, одним из которых является технология проволочно-вырезной электроэрозионной обработки (ПВЭЭО). Статья посвящена теоретическому и регрессионному моделированию величины ширины реза при ПВЭЭО труднообрабатываемых материалов. Предметами исследования являются: величина межэлектродного зазора, точность при ПВЭЭО труднообрабатываемых материалов. Цель работы – повышение точности процесса ПВЭЭО сложнопрофильных изделий, выполненных из труднообрабатываемых материалов. **Методы.** Экспериментальные исследования проводились по методу классического эксперимента и регрессионного анализа. Для проведения экспериментов использовали проволочно-вырезной электроэрозионный станок *ELECTRONICA EcoCut*. Эксперименты проводились на среднем режиме обработки: время включения импульсов – 10 мкс, коэффициент заполнения импульсами – 30 %, напряжение – 75 В. В процессе обработки использовалась латунная проволока *bercocut* ($d = 0,25$ мм) и чистая дистиллированная вода. **Результаты и обсуждения.** Получены теоретическая и регрессионная модель для расчета ширины реза при ПВЭЭО изделий, выполненных из труднообрабатываемых материалов. Показана зависимость параметра от режимов обработки и физико-механических свойств материала. Установлено, что при варьировании коэффициента заполнения T_{an} функция отклика изменяется согласно квадратичной зависимости. Максимальная величина ширины реза $B = 350$ мкм достигается при $T_{an} = 40$ % и времени включения импульсов $T_{on} = 15$ мкс. Написана рабочая программа, с помощью которой возможно рассчитать значение ширины реза, а также величину коррекции, вносимой в рабочую программу для выполнения годного размера. Обеспечена точность изготовления детали «крайний лист статора». Данная технология внедрена при производстве изделий нефтедобывающего оборудования.

Для цитирования: Шлыков Е.С., Абляз Т.Р., Муратов К.Р. Обеспечение точности проволочно-вырезной электроэрозионной обработки изделий, выполненных из труднообрабатываемых материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 6–17. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-6-17.

Введение

В настоящее время наблюдается тенденция к усложнению геометрических форм деталей, входящих в состав машин и механизмов. Изделия изготавливаются из современных конструкци-

онных материалов с повышенными физико-механическими свойствами, что позволяет повысить надежность всего механизма. В работах [1, 2] отмечено, что номенклатура сложнопрофильных деталей увеличивается с каждым годом и в настоящее время составляет порядка трети от всей доли выпускаемых изделий.

Сложная геометрическая форма изделия в сочетании с повышенными механическими свойствами конструкционного материала накладывает технологические ограничения на спо-

*Адрес для переписки

Шлыков Евгений Сергеевич, к.т.н., доцент
 Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
 Комсомольский проспект, 29,
 614990, г. Пермь, Россия.
 Тел: 8 (342) 2-198-324, e-mail: Kruspert@mail.ru

соб формообразования. Зачастую невозможно полноценно использовать накопленный опыт и технологические рекомендации по обработке резанием металлов, что вызывает необходимость проведения дополнительных исследований [3–8]. Наблюдается переход от традиционных лезвийных способов обработки к электрофизическим методам, таким как проволочно-вырезная электроэрозионная обработка (ПВЭЭО). С помощью данной технологии возможна обработка криволинейного профиля с заданной точностью, а также изделий, имеющих малые габариты, независимо от физико-механических характеристик обрабатываемого материала.

Литературные источники и технологические таблицы указывают на то, что при сравнении производительности различных методов обра-

ботки материалов электроэрозионная обработка позволяет обеспечивать скорость резания, сопоставимую с традиционными лезвийными методами, используя меньшие затраты энергии [3, 4, 6, 11]. Сравнение производительности (в логарифмических координатах) для разнообразных методов обработки представлено на рис. 1.

Отмечено, что применение технологий гидроабразивной, лазерной и плазменной резки становится эффективным при освоении изделий, не имеющих жестких требований по точности обработки. Однако при обработке данными методами значение ширины реза не позволяет изготовление и последующую обработку изделий, имеющих небольшие габариты. На рис. 2 показано пропорциональное отношение ширины реза при обработке различными методами, а

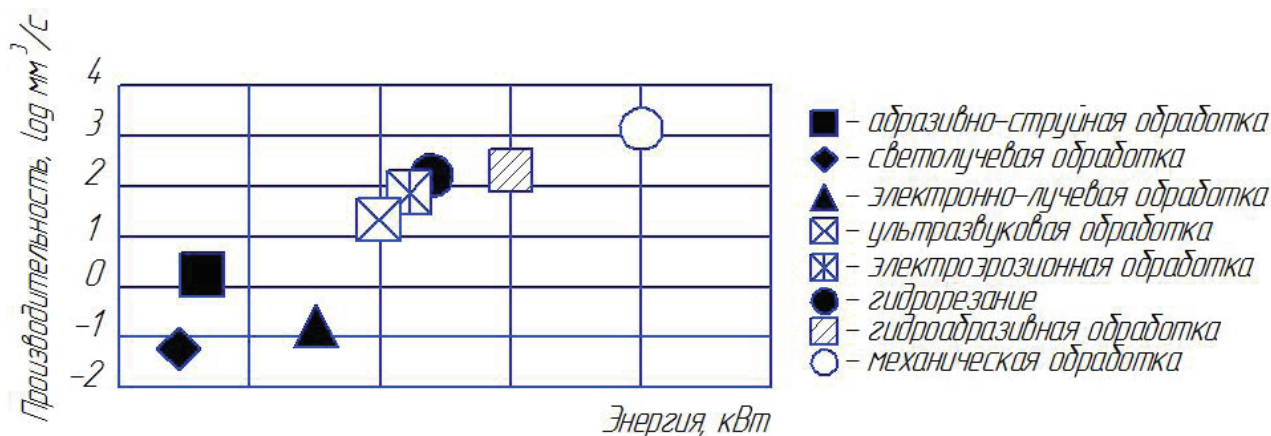


Рис. 1. Значения производительности методов обработки

Fig. 1. Processing performance values

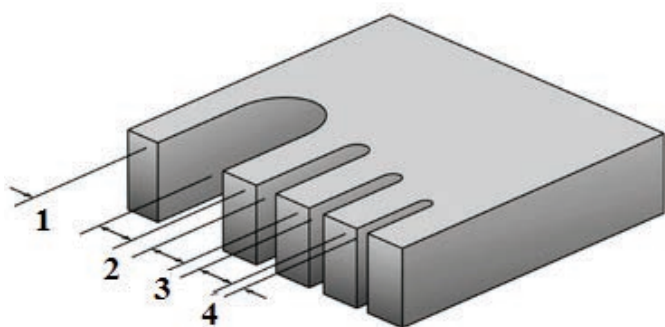


Рис. 2. Ширина реза при различных видах обработки:

1 – плазменная резка; 2 – лазерная резка; 3 – гидроабразивная резка; 4 – электроэрозионная обработка

Fig. 2. Cutting width for various types of processing:

1 – plasma cutting; 2 – laser cutting; 3 – hydroabrasive cutting; 4 – electric discharge machining

также, что наименьшую ширину реза можно обеспечить с помощью метода ПВЭЭО. Одним из факторов, влияющих на обеспечение точности при ПВЭЭО труднообрабатываемых материалов, является величина межэлектродного зазора. Погрешность межэлектродного зазора зависит от неоднородностей структур электрода-инструмента (ЭИ) и обрабатываемой заготовки, а также свойств рабочей жидкости (РЖ).

Количество удаляемого с заготовки металла и размеры электроэрозионных лунок зависят от следующих факторов: свойства РЖ, физико-механические свойства заготовки, а также параметры обработки (рис. 3). Соответственно при ПВЭЭО труднообрабатываемых материалов на поверхности заготовки образуются лунки,

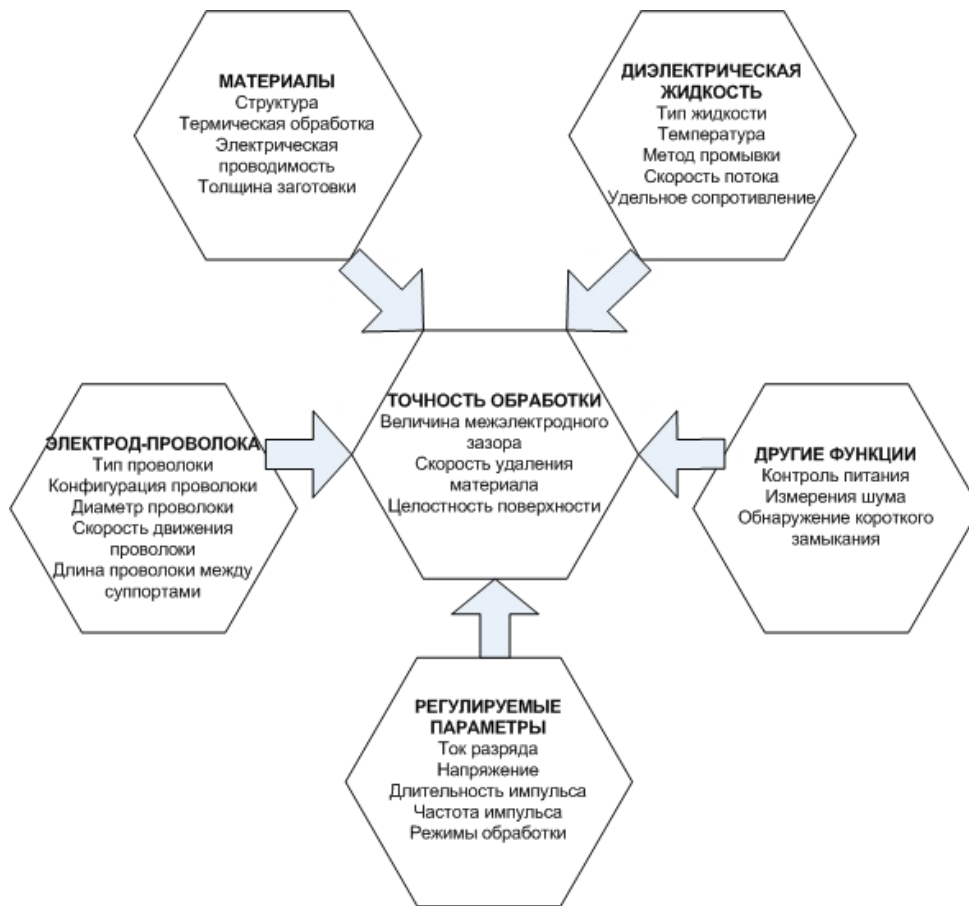


Рис. 3. Факторы, влияющие на точность ПВЭЭО

Fig. 3. Factors affecting accuracy of EDM

имеющие различные размеры. Данный фактор существенно усложняет прогнозирование значения межэлектродного зазора, а также соответственно соблюдение точности ПВЭЭО [8–10]. На рис. 3 показано, что на точность обработки влияет совокупность различных факторов.

На сегодняшний день существует потребность в разработке теоретических моделей, которые позволяют находить параметры обработки для процесса ПВЭЭО труднообрабатываемых изделий, обеспечивающих необходимую точность [11–14].

Актуальной задачей является получение теоретической и эмпирической зависимости влияния параметров электроэрозионной обработки, физико-механических свойств материала и толщины заготовки на формирование точности ПВЭЭО поверхностей сложнопрофильных изделий, выполненных из труднообрабатываемых материалов.

Цель работы: повышение точности процесса ПВЭЭО сложнопрофильных изделий, выполненных из труднообрабатываемых материалов.

Задачи

1. Разработать теоретическую и эмпирическую модель для расчета ширины реза при ПВЭЭО изделий, выполненных из труднообрабатываемых материалов. Данные модели обеспечат прогнозирование точности обработки, основываясь на физико-механических характеристиках обрабатываемого материала, а также режимах резания.

2. Вычислить необходимое значение коррекции траектории движения ЭИ рабочей программы, обеспечивающее заданную точность ПВЭЭО при изготовлении изделия типа «крайний лист статора».

Методика исследований

В качестве обрабатываемых материалов заготовок использовали закаленную сталь 30ХГС и сталь 40Х (ГОСТ 4543–71), а также титан ВТ-01 (ГОСТ 19807–91). Толщина обрабатываемых заготовок составляла 3 мм.

Оборудование – ПВЭЭ станок *Electronica EcoCut*. В качестве электрода инструмента (ЭИ)

выбрана латунная проволока марки *BercoCut* диаметром 0,25 мм, а в качестве рабочей жидкости применяют чистую дистиллированную воду. Для измерения ширины реза B (мкм) использован микроскоп *Olympus GX51*, увеличение 100 крат.

В работе представлена регрессионная зависимость, полученная с помощью факторного планирования эксперимента. Для оценки оптимальности применялось ортогональное центральное композиционное планирование. Ортогональность обеспечивает оценку всех коэффициентов регрессии независимо друг от друга [13–15]. Экспериментальная часть по ос-

новному плану проведена для стали 40X (ГОСТ 4543–71). Расширение матрицы для стали 30ХГС и титана ВТ-01 осуществлялось путем проведения выборочных экспериментов в центре плана и последующим расчетом поправочного коэффициента.

Входными факторами выбраны: U – напряжение, В; T_{on} – время действия импульса, мкс; T_{au} – коэффициент заполнения импульсами, %.

Кодированные параметры представлены в табл. 1. Выходным параметром является значение ширины электроэрозионного реза. Ширина реза включает в себя диаметр ЭИ и величину бокового зазора.

Таблица 1

Table 1

Кодирование параметров
Parameter Encoding

Факторы	Нижний уровень	Верхний уровень	Средний уровень	Нижнее «звездное» плечо	Верхнее «звездное» плечо
U , В	50	100	75	40	110
T_{on} , мкс	5	15	10	2	20
T_{au} , %	10	50	30	5	60

Каждый эксперимент для достоверности повторялся по три раза. Матрица планирования эксперимента с учетом «звездного» плеча показана в табл. 2.

Проверки однородности и адекватности модели представлены в работе [16]. Значимость коэффициентов оценивалась с помощью критерия Стьюдента. Адекватность модели проверялась по критерию Фишера [16].

Результаты и их обсуждение

В связи с тем что технология проволоочно-вырезной электроэрозионной обработки является бесконтактным методом резки, при проектировании получения годного изделия и расчете ширины реза стоит учитывать размер ЭИ ($2R$), величину межэлектродного зазора (МЭЗ) и вносить корректировки в управляющую рабочую программу (рис. 4). Правильная коррекция позволяет обеспечивать необходимую точность обработки.

При теоретическом моделировании ширины реза рассматривается физическая полагающая процесса ПВЭЭО. Суть данного процесса заключается в том, что между ЭИ и ЭД возникает энергия разряда искры, которая преобразуется в тепловую энергию. Перенос энергии способствует разрушению и съему материала. Количество снятого материала с заготовки за время действия единичного импульса оценивается коэффициентом съема материала *Material Removal Rate (MRR)*. Данный коэффициент можно рассчитать по формуле [15, 17–18]

$$MRR = \frac{m}{T_{on}}, \quad (1)$$

где T_{on} – время действия единичного импульса (мкс); m – масса материала (кг).

Анализ литературных данных [2, 15, 18–21] показал, что *MRR* зависит от величины МЭЗ S (м), линейной скорости обработки $Q_{л}$ (м/с), физико-механических свойств обрабатываемого

Матрица ортогонального центрально-композиционного плана

Planning matrix

№ п/п	X_0	X_1 (U, В)	X_2 (T_{on} , мкс)	X_3 (T_{au} , %)	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_4	X_5	X_6
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	0.27	0.27	0.27
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	0.27	0.27	0.27
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	0.27	0.27	0.27
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	0.27	0.27	0.27
5	1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	0.27	0.27	0.27
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	0.27	0.27	0.27
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	0.27	0.27	0.27
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0.27	0.27	0.27
9	+1	-1.215	0	0	0	0	0	0.746	-0.73	-0.73
10	+1	+1.215	0	0	0	0	0	0.746	-0.73	-0.73
11	+1	0	-1.215	0	0	0	0	-0.73	0.746	-0.73
12	+1	0	+1.215	0	0	0	0	-0.73	0.746	-0.73
13	+1	0	0	-1.215	0	0	0	-0.73	-0.73	0.746
14	+1	0	0	+1.215	0	0	0	-0.73	-0.73	0.746
15	+1	0	0	0	0	0	0	-0.73	-0.73	-0.73

материала, а также высоты обрабатываемой заготовки h (м).

Коэффициент съема материала вычисляем по формуле

$$MRR = 2(R + S)h\rho Q_L(q, h), \quad (2)$$

где R – радиус ЭИ (м); S – межэлектродный зазор (м); ρ – плотность обрабатываемого материала (кг/м^3); h – высота заготовки (м); $Q_L(q, h)$ – линейная скорость обработки.

Энергия, выделяемая во время пробоя между ЭИ и ЭД, согласно закону сохранения энергии переходит в тепловую энергию. Энергия импульса $W_{и}$ (Дж), которая выделяется в межэлектродном зазоре, распределяется между ЭИ и ЭД, обеспечивает удаление металла с заготовки [1]. Энергию импульса рассчитываем по формуле

$$W_{и} = \int_0^{tu} UIdT_{on}, \quad (3)$$

где U – напряжение на электродах, В; I – сила тока, А; T_{on} – время действия импульса, мкс.

Для обеспечения постоянства значений данных величин уравнение (3) можно записать в виде

$$W_{и} = UIT_{on}. \quad (4)$$

Равномерное формирование искрового разряда при электроэрозионной обработке зависит от ряда факторов. Для повышения точности уравнения (3) вводится поправочный коэффициент, учитывающий долю полезного использования энергии импульса $\eta_{и}$ [1, 15]. Данный коэффициент можно рассчитать по формуле

$$\eta_{и} = (1 - K_1)(1 - K_2), \quad (5)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий потери энергии при нагреве и испарении РЖ; K_2 – коэффициент, учитывающий потери энергии при нагреве электрода-инструмента.

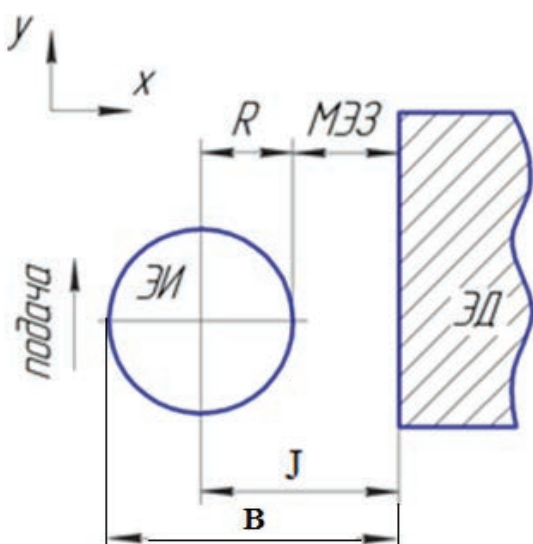


Рис. 4. Формирование величины коррекции J и ширины реза B в плоскости обработки XY :

R – радиус ЭИ (м); ЭИ – электрод-инструмент; МЭЗ – межэлектродный зазор (м); ЭД – электрод-деталь; J – коррекция (м); B – ширина реза (м)

Fig. 4. The formation of the correction value J and cutting width B in the processing plane XY :

R is the radius of the electrode tool (m); EI – electrode-tool; MEZ – interelectrode gap (m); ED – electrode-part; J – correction (m); B – cutting width (m)

Для плавления ЭД на его поверхность подается определенное количество теплоты Q (Дж). Это тепло, используемое для нагрева, а соответственно и плавления и последующего испарения массы ЭД, определяется по формуле

$$Q = m(c_{\text{ТВ}}\Delta T_{\text{Пл}} + \lambda_{\text{Пл}} + r), \quad (6)$$

где m – масса заготовки, кг; $c_{\text{ТВ}}$ – удельная теплоемкость материала в твердом состоянии, Дж/кг·К; ΔT – разность температур начальной и конечной точки нагрева, К; $\lambda_{\text{Пл}}$ – удельная теплота плавления материала, Дж/кг; r – удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Если $K = (c_{\text{ТВ}}\Delta T_{\text{Пл}} + \lambda_{\text{Пл}} + C_{\text{Ж}}\Delta T_{\text{Ж}} + r)$, где $c_{\text{Ж}}$ – удельная теплоемкость материала в жидком состоянии, Дж/кг·К, тогда становится возможным из уравнений (4) и (6) выразить значение времени действия импульса и массы материала. Подставляем данные значения в выражение (1):

$$MRR = \frac{Q\eta_{\text{и}}UI}{KW_{\text{и}}} = \frac{\eta_{\text{и}}UI}{K}. \quad (7)$$

Уравниванием выражений (2) и (7) становится возможным вычислить величину МЭЗ:

$$S = \frac{\eta_{\text{и}}UI}{K \cdot 2h\rho Q_{\text{Л}}(q, h)} - R. \quad (8)$$

В качестве ЭИ на проволочно-вырезных электроэрозионных станках используется проволока, обладающая различным диаметром. Самым распространенным видом ЭИ является латунная проволока, имеющая диаметр 0,25 мм. Чтобы рассчитать значение коррекции J , нужно к значению межэлектродного зазора S (8) прибавить величину радиуса проволоки, а для расчета ширины реза B – величину диаметра проволоки:

$$B = \frac{\eta_{\text{и}}UI}{K \cdot 2h\rho Q_{\text{Л}}(q, h)} + R. \quad (9)$$

Данная теоретическая модель позволяет рассчитать значение ширины реза и соответственно величину коррекции для изменения управляющей рабочей программы. Внесением данной коррекции становится возможным получение годного размера.

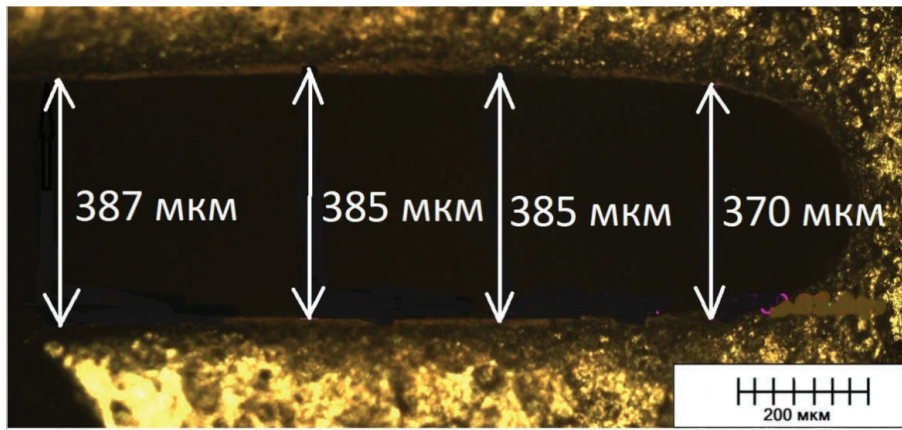
Уравнение (9) говорит о том, что ширина реза и значение коррекции варьируются в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала, высоты обрабатываемой заготовки, а также режимов резания.

Для подтверждения теоретической модели проведен факторный эксперимент по измерению величины ширины реза. Согласно проведенному эксперименту, а также сопутствующему регрессионному анализу получена регрессионная зависимость, позволяющая рассчитать величину бокового межэлектродного зазора:

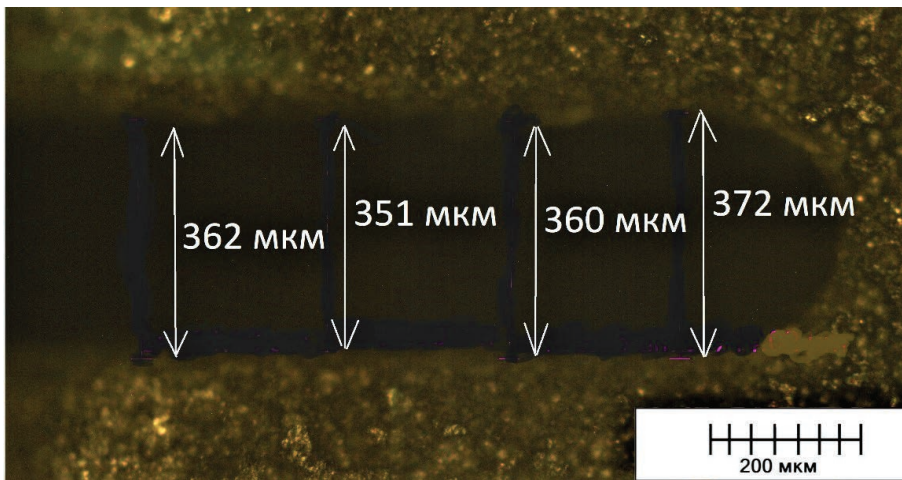
$$Y = l \left(0.03 + 0.0003U^2 - 0.003T_{\text{аи}} - 0.003U + 0.0001T_{\text{он}}T_{\text{аи}} - 0.0014T_{\text{он}} - 0.0003T_{\text{аи}}^2 + 0.01T_{\text{аи}} \right), \quad (10)$$

где l – это коэффициент, полученный путем выборочного повторения экспериментов в центре плана для материала стали 30ХГС и титана ВТ-01 и учитывающий физико-механические свойства данных материалов

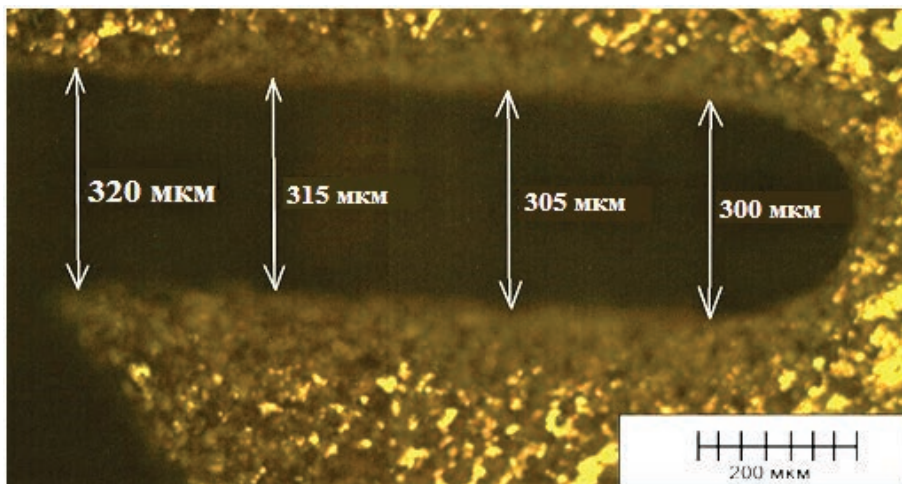
На рис. 5 представлены результаты эксперимента по замеру ширины реза при обработке закаленных сталей 30ХГС и 40Х и титана марки ВТ-01 (факторы соответствуют значениям центра плана).



a



б



в

Рис. 5. Ширина реза при обработке латунным ЭИ диаметром 0,25 мм различных материалов:

a – закаленная сталь 30ХГС; *б* – закаленная сталь 40Х; *в* – титан ВТ-01

Fig. 5. The width of the cut when processing brass EI with a diameter of 0.25 mm of various materials:

a – hardened steel 30KhGS; *б* – hardened steel 40Kh; *в* – titanium VT-01

Анализ данной регрессионной зависимости, выполненной для заготовки из стали 40Х, установил, что на значение ширины реза влияет совокупность всех входных факторов. Для наглядного рассмотрения регрессионной зависимости представляем ее в виде гиперповерхности (рис. 6).

Из рис. 6 можно сделать вывод о том, что при варьировании коэффициента заполнения T_{au} функция отклика изменяется согласно квадратичной зависимости. Изменение величины длительности импульса T_{on} проходит по линейной зависимости. Установлено, что наибольшее значение ширина реза, равное 350 мкм, достигается при $T_{au} = 40\%$, $T_{on} = 15$ мкс. При использовании данных результатов становится возможным корректировать размер ЭИ и обеспечивать показатели точности ПВЭО.

На рис. 7 показано расхождение величины ширины реза, рассчитанное теоретическим методом, регрессионным анализом и полученное в результате экспериментов. С увеличением физико-механических свойств материала (в данном случае теплопроводности, температуры плавления) уменьшается величина межэлектродного зазора. Это подтверждается полученными экспериментальными данными.

Из рис. 7 также видно, что расхождение теоретической модели и регрессионной модели составляет не более 10 %, что говорит об адекватности этих моделей.

На основе полученной теоретической модели написана управляющая рабочая программа, обеспечивающая изготовление изделия «крайний лист статора». Для изготовления такого изделия используется проволочно-вырезной электроэрозионный станок с системой числового программного управления *Elcam*. Материал изделия – сталь 40Х.

Обработка проводилась на режимах, представленных в методике исследования: время включения импульса $T_{on} = 10$ мкс; коэффициент заполнения импульсами $T_{au} = 30\%$, напряжение $U = 75$ В.

Пользуясь данной теоретической моделью, можно посчитать значение коррекции траектории $J = 0,165$ мм. При обходе рабочего контура изделия «крайний лист статора» коррекция T вносится в управляющую программу с помощью команды $G41 j = 0,165$. Траектория движения проволочного ЭИ и готовое изделие «крайний лист статора» представлены на рис. 8.

Управляющая рабочая программа с заданной точностью при обеспечении стабильности процесса ПВЭО позволяет получить изделие типа «крайний лист статора».

Выводы

1. Получены теоретическая и регрессионная модели для расчета ширины реза при ПВЭО изделий, выполненных из труднообрабатываемых

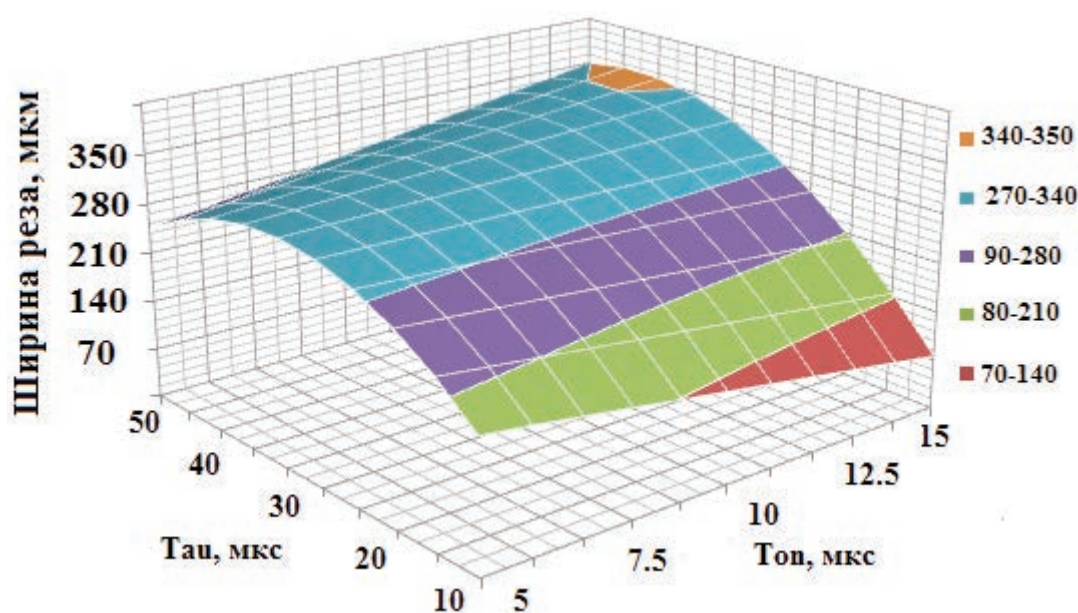


Рис. 6. Гиперповерхность при $U = 75$ В

Fig. 6. Hypersurface at $U = 75$ V

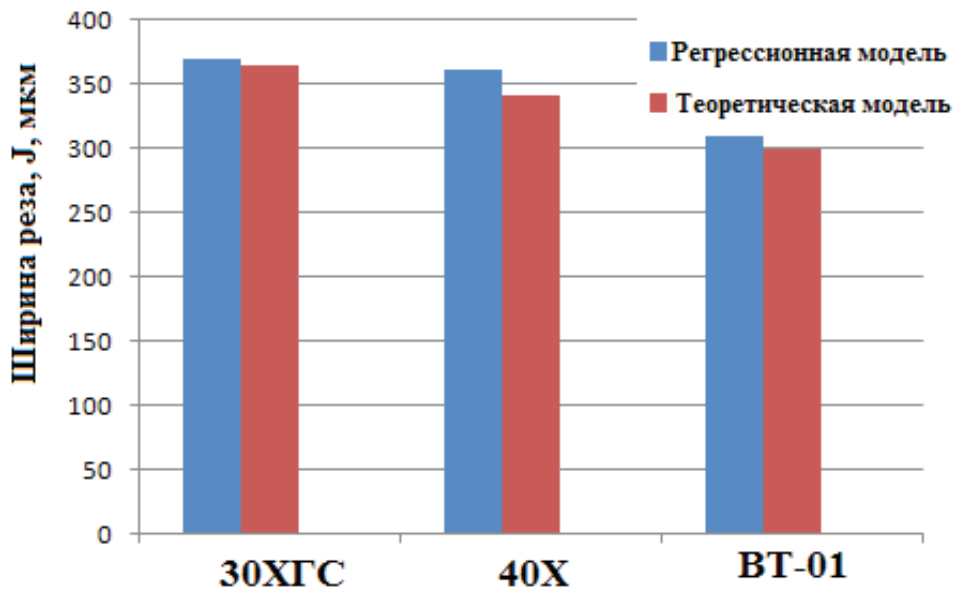


Рис. 7. Расхождение величины ширины реза, рассчитанное теоретическим методом и регрессионным анализом

Fig. 7. The difference in the cut width, calculated by the theoretical method and regression analysis

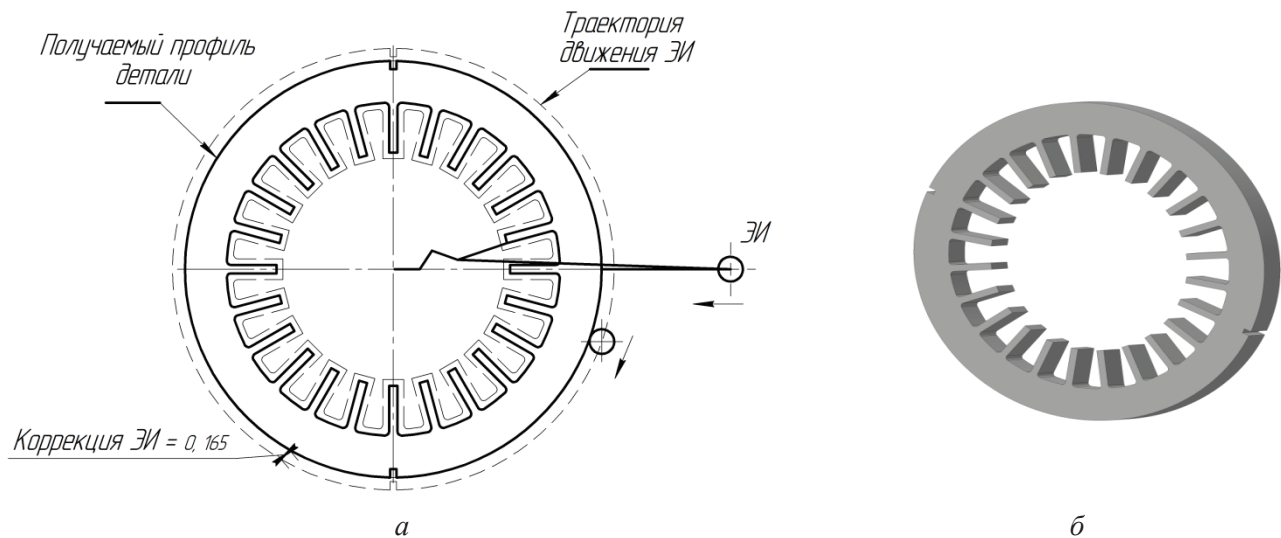


Рис. 8. Траектория движения ЭИ (а); изделие «крайний лист статора» (б)

Fig. 8. Trajectory of the ET (a); stator margin plate (b)

материалов. Показана зависимость параметра от режимов обработки и физико-механических свойств материала. Установлено, что при варьировании коэффициента заполнения T_{au} функция отклика изменяется согласно квадратичной зависимости. Максимальная величина ширины реза $B = 350$ мкм достигается при $T_{au} = 40\%$, $T_{on} = 15$ мкс.

2. Получено значение ширины реза, а также величины коррекции, которую необходимо выполнить для получения годного размера. Обеспечена точность изготовления детали «крайний лист статора». Данная технология внедрена при производстве изделий нефтедобывающего оборудования.

Список литературы

1. *Panner Selvam M., Ranjith Kumar P.* Optimization kerf width and surface roughness in wirecut electrical discharge machining using brass wire // *Mechanics and Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol. 21, N 1. – P. 37–55.
2. Analysis of copper mixed kerosene servotherm in EDM of Monel 400 / P.A. Anandakumar, B. Molla, F. Biruke, S. Aravind // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 197. – P. 012004. – DOI: 10.1088/1757-899X/197/1/012004.
3. Study on cutting parameter on kerf width using wire electrical discharge machining of Inconel 718 / C.M.H. Che Nor, M. Kasim, E. Mohamad, T. Ito, M. Sulaiman // *24th Design Engineering Systems Division JSME Conference Japan Society of Mechanical Engineers*. – Tokushima, Japan, 2014. – Vol. 14–27. – DOI: 10.13140/2.1.1814.7844.
4. Improve wire EDM performance at different machining parameters – ANFIS modeling / I. Maher, L.H. Ling, A.D. Sarhan, M. Hamdi // *IFAC-PapersOnLine*. – 2015. – Vol. 48, iss. 1. – P. 105–110. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.05.109.
5. *Rouniyar A.K., Shandilya P.* Study on powder mixed electrical discharge machining process: a review // *DAAAM International Scientific Book*. – Vienna, Austria, 2019. – Ch. 10. – P. 123–142. – DOI: 10.2507/daaam.scibook.2019.10.
6. Relationship between occurrence of material removal and bubble expansion in electrical discharge machining / S. Hayakawa, Y. Sasaki, F. Itoigawa, T. Nakamura // *Procedia CIRP*. – 2013. – Vol. 6. – P. 174–179. – DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.095.
7. *Chowdhury A.G.K., Ali M.Y., Banu A.* Analysis of corner radius in dry micro WEDM // *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. – 2020. – Vol. 9, N 2. – DOI: 10.18178/ijmerr.9.1.158–162.
8. *Özerkan H.B.* Simultaneous machining and surface alloying of AISI 1040 steel by electrical discharge machining with boron oxide powders // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2018. – Vol. 32 (9). – P. 4357–4364. – DOI: 10.1007/s12206-018-0834-0.
9. *Kinoshita N., Fukui M., Kimura Y.* Study on wire-EDM: inprocess measurement of mechanical behaviour of electrode-wire // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 1984. – Vol. 33, N 1. – P. 89–92. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61386-9.
10. Wire analysis and control for precision EDM cutting / Dauw D.F., Sthioul H., Delpretti R., Tricarico C. // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 1989. – Vol. 38, N 1. – P. 191–194. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62682-1.
11. *Dey S., Roy D.C.* Experimental study using different tools // *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*. – 2013. – Vol. 3, iss. 3. – P. 1263–1267.
12. *Weingärtner E., Kuster F., Wegener K.* Modeling and simulation of electrical discharge machining // *Procedia CIRP*. – 2012. – Vol. 2. – P. 74–78. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.05.043.
13. *Abbas N.M., Solomon D.G., Bahari Md. F.* A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM) // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2007. – Vol. 47. – P. 1214–1228. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.08.026.
14. *Yeo S.H., Kurnia W., Tan P.C.* Electro-thermal modelling of anode and cathode in micro-EDM // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2007. – Vol. 40 (8). – P. 2513–2521. – DOI: 10.1088/0022-3727/40/8/015.
15. Transient response of wire vibration system in wire electrical discharge machining / H. Yamada, N. Mohri, K. Furutani, N. Saito, T. Magara // *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*. – 1997. – Vol. 63, iss. 11. – P. 1548–1552. – DOI: 10.2493/jjspe.63.1548.
16. *Шлыков Е.С.* Повышение эффективности электроэрозионной обработки изделий из сталей с высокотемпературной износостойкостью: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2018. – 127 с.
17. *Enache S., Opran C.* Dynamic stability of the technological machining system in EDM // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 1993. – Vol. 42 (1). – P. 209–214. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62427-5.
18. *Yan M.-T., Lai Y.-P.* Surface quality improvement of wire-EDM using a fine-finish power supply // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2007. – Vol. 47. – P. 1686–1694. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.01.006.
19. *Balleys F., Piantchenko Ch.* Surface integrity of materials machined by wire EDM machines // *EDM Technology Transfer*. – 1996. – Vol. 4. – P. 3–6.
20. *Kobayashi K.* The present and future technological developments of EDM and ECM // *Proceedings of the 11th International Symposium for Electromachining (ISEM-11)*. – Lausanne, Switzerland, 1995. – P. 29–47.
21. *Szczesniak S.* Anti-electrolysis is pro EDM // *Modern Machine Shop*. – 1998. – Vol. 70 (9). – P. 70–74.

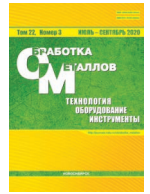
Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Ensuring the Accuracy of Wire-cutting EDM processing of Products made of Hard-to-Handle Materials

Evgenii Shlykov^{a,*}, Timur Ablyaz^b, Karim Muratov^c

Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-8076-0509>, Kruspert@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-6607-4692>, lowrider11-13-11@mail.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0001-7612-8025>, Karimur_80@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 29 April 2020

Revised: 13 May 2020

Accepted: 02 June 2020

Available online: 15 September 2020

Keywords:

Wire-cutting electrical discharge machining

Processing modes

Tool electrode

Processing accuracy

Funding

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on state assignment FSNM-2020-0028.

ABSTRACT

Introduction. In order to improve operational properties of the manufactured product range in engineering, materials, which have enhanced physical and mechanical properties, are used. The application of such materials makes it possible to manufacture the items of small dimensions, but with high functionality. When processing such materials, significant wear of the cutting tool occurs, and when processing items of complex profile, it is necessary to use additional equipment. These factors increase the cost of manufacturing suitable products. For the processing of such products, it is advisable to use electrophysical processing methods, one of which is the technology of wire-cutting electrodischarge machining (EDM). The paper is devoted to theoretical and regression modeling of the width of the cut during EDM difficult to process materials. **Subjects of research** are: the magnitude of the interelectrode gap, the accuracy of EDM hard-to-handle materials. **The aim of the work** is to increase the accuracy of the process of EDM complex products, made of hard-to-handle materials. **Methods.** Experimental studies are carried out according to the method of the classical experiment. For the experiments, an Electronica EcoCut wire-cutting EDM machine is used. The experiments are carried out in the middle processing mode: pulse turn-on time $T_{on} = 10 \mu s$, pulse fill factor $T_{au} = 30 \%$, average voltage $U = 75 V$. The electrode tool is a brass wire having a diameter of 0.25 mm. The working fluid is distilled water. **Results and Discussion.** Theoretical and regression models are obtained for calculating the cutting width during EDM products made of hard-to-handle materials. The dependence of the parameter on the processing conditions and the physicomechanical properties of the material is shown. It is found that with varying fill factor Tau, the response function changes according to the quadratic dependence. The maximum value of the cutting width $B = 350 \mu m$ is achieved at $T_{au} = 40 \%$, $T_{on} = 15 \mu s$. A work program is written, which gives opportunity to calculate the value of the cut width, as well as the amount of correction introduced into the work program to complete a suitable size. The accuracy of manufacturing the "stator margin plate" part is ensured. This technology is introduced in the production of oil-producing equipment.

For citation: Shlykov E.S., Ablyaz T.R., Muratov K.R. Ensuring the accuracy of wire-cutting EDM processing of products made of hard-to-handle materials. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 6–17. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-6-17. (In Russian).

References

1. Panner Selvam M., Ranjith Kumar P. Optimization kerf width and surface roughness in wirecut electrical discharge machining using brass wire. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 2017, vol. 21, no. 1, pp. 37–55.
2. Anandakumar P.A., Molla B., Biruke F., Aravind S. Analysis of copper mixed kerosene servotherm in EDM of Monel 400. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 197, p. 012004. DOI: 10.1088/1757-899X/197/1/012004.
3. Che Nor C.M.H., Kasim M., Mohamad E., Ito T., Sulaiman M. Study on cutting parameter on kerf width using wire electrical discharge machining of Inconel 718. *24th Design Engineering Systems Division JSME Conference Japan Society of Mechanical Engineers*, Tokushima, Japan, 2014, vol. 14–27. DOI: 10.13140/2.1.1814.7844.

* Corresponding author

Shlykov Evgenii S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Perm National Research Polytechnic University,
 29 Komsomolsky prospekt,
 614990, Perm, Russian Federation
 Tel.: 8 (342) 2-198-324, e-mail: Kruspert@mail.ru

4. Maher I., Ling L.H., Sarhan A.D., Hamdi M. Improve wire EDM performance at different machining parameters – ANFIS modeling. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 48, iss. 1, pp. 105–110. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.05.109.
5. Rouniyar A.K., Shandilya P. Study on powder mixed electrical discharge machining process: a review. *DAAAM International Scientific Book*, Vienna, Austria, 2019, ch. 10, pp. 123–142. DOI: 10.2507/daaam.scibook.2019.10.
6. Hayakawa S., Sasaki Y., Itoigawa F., Nakamura T. Relationship between occurrence of material removal and bubble expansion in electrical discharge machining. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 6, pp. 174–179. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.095.
7. Chowdhury A.G.K., Ali M.Y., Banu A. Analysis of corner radius in dry micro WEDM. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2020, vol. 9, no 2, DOI: 10.18178/ijmerr.9.1.158–162.
8. Özerkan H.B. Simultaneous machining and surface alloying of AISI 1040 steel by electrical discharge machining with boron oxide powders. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, vol. 32 (9), pp. 4357–4364. DOI: 10.1007/s12206-018-0834-0.
9. Kinoshita N., Fukui M., Kimura Y. Study on wire-EDM: inprocess measurement of mechanical behaviour of electrode-wire. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1984, vol. 33, no. 1, pp. 89–92. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61386-9.
10. Dauw D.F., Sthioul H., Delpretti R., Tricarico C. Wire analysis and control for precision EDM cutting. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1989, vol. 38, no. 1, pp. 191–194. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62682-1.
11. Dey S., Roy D.C. Experimental study using different tools. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2013, vol. 3, iss. 3, pp. 1263–1267.
12. Weingärtner E., Kuster F., Wegener K. Modeling and simulation of electrical discharge machining. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 2, pp. 74–78. DOI: 10.1016/j.procir.2012.05.043.
13. Abbas N.M., Solomon D.G., Bahari Md F. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, vol. 47, pp. 1214–1228. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.08.026.
14. Yeo S.H., Kurnia W., Tan P.C. Electro-thermal modelling of anode and cathode in micro-EDM. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, vol. 40 (8), pp. 2513–2521. DOI: 10.1088/0022-3727/40/8/015.
15. Yamada H., Mohri N., Furutani K., Saito N., Magara T. Transient response of wire vibration system in wire electrical discharge machining. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 1997, vol. 63, iss. 11, pp. 1548–1552. DOI: 10.2493/jjspe.63.1548.
16. Shlykov E.S. *Povyshenie effektivnosti elektroerozionnoi obrabotki izdelii iz stalei s vysokotemperaturnoi iznosostoikost'yu*. Diss. kand. tehn. nauk [Improving the efficiency of electrical discharge machining of steel products with high temperature wear resistance. PhD eng. sci. diss.]. Perm, 2018. 127 p.
17. Enache S., Opran C. Dynamic stability of the technological machining system in EDM. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1993, vol. 42 (1), pp. 209–214. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62427-5.
18. Yan M.-T., Lai Y.-P. Surface quality improvement of wire-EDM using a fine-finish power supply. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, vol. 47, pp. 1686–1694. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.01.006.
19. Balleys F., Piantchenko Ch. Surface integrity of materials machined by wire EDM machines. *EDM Technology Transfer*, 1996, vol. 4, pp. 3–6.
20. Kobayashi K. The present and future technological developments of EDM and ECM. *Proceedings of the 11th International Symposium for Electromachining (ISEM-11)*, Lausanne, Switzerland, 1995, pp. 29–47.
21. Szczesniak S. Anti-electrolysis is pro EDM. *Modern Machine Shop*, 1998, vol. 70 (9), pp. 70–74.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).