

УДК 621.9.048

DOI: 10.12737/article_59ae90c63c66d6.60177261

А.А. Груздев, аспирант,
Ю.А. Моргунов, к.т.н., **Б.П. Саушкин**, д.т.н.
 (Московский политехнический университет, 107023, Москва, ул. Б.Семеновская, 38)
 E-mail: morgunov56@mail.ru; sbp47@mail.ru

Особенности электроэрозионной обработки разрядными импульсами малых энергий

Проведены исследования энергетических характеристик эрозионного импульса и геометрических параметров единичных эрозионных лунок при наложении разрядных импульсов малых энергий. Показана нелинейная зависимость энергии импульса от его длительности в данных условиях. На основании результатов эксперимента уточнена величина коэффициента электроэрозионной обрабатываемости для стали 12Х18Н10Т.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка; единичная электроэрозионная лунка; коэффициент электроэрозионной обрабатываемости.

A.A. Gruzdev, Post graduate student,
Yu.A. Morgunov, Can. Eng., **B.P. Saushkin**, D. Eng.
 (Moscow Polytechnic University, 38, B. Semyonovskaya Str., Moscow 107023)

Peculiarities of electro-erosion machining with discharge low-energy pulses

The investigations of energetic characteristics of an erosion pulse and geometric parameters of single erosion dimples at the application of discharge low-energy pulses are carried out. A non-linear dependence of pulse energy upon its length under given conditions is shown. On the basis of the experiment results a value of the factor of electro-erosion workability for steel 12Ch18N10T is specified.

Keywords: electro-erosion machining; single electro-erosion dimple; factor of electro-erosion workability.

Актуальным направлением развития технологий электроэрозионной обработки (ЭЭО) становится обработка микрообъектов. Так, по материалам международных симпозиумов по электрической обработке материалов (International Symposium for Electromachining, ISEM) в 2010 – 2016 гг. суммарная доля статей по электроэрозионной микрообработке к общему объему статей по ЭЭО составила 20 %.

Эта область применения ЭЭО характеризуется использованием разрядных импульсов малых энергий в диапазоне 50...500 мкДж [1, 2]. Прошивку отверстий малого диаметра и электроэрозионную проволочную вырезку проводят обычно в диапазоне энергий разрядных импульсов 250...3500 мкДж [3, 4]. Поскольку энергию разрядного импульса изменяют в большинстве случаев, регулируя длительность импульса, речь идет об импульсах длительностью 0,5...10 мкс. Учитывая, что длительность искровой стадии разрядного импульса имеет порядок 10^{-6} с, можно предположить, что роль этой стадии в развитии процесса разряда в этом случае будет существен-

ной.

Недостаточная исследованность этого вопроса затрудняет расчетную оценку производительности операций электроэрозионной микрообработки, их нормирование и заставляет выбирать параметры режима обработки опытным путем.

При оценке объемной производительности ЭЭО используют выражение [5]:

$$Q = k_m k_{ми} k_{ж} k_{ро} k_{эф} W_p f, \quad (1)$$

где k_m – коэффициент, определяемый теплофизическими характеристиками материала заготовки; $k_{ми}$ – коэффициент, определяемый материалом электрода-инструмента; $k_{ж}$ – коэффициент, зависящий от свойств рабочей жидкости; $k_{ро}$ – коэффициент, зависящий от параметров режима, в частности, от полярности подключения электродов; $k_{эф}$ – коэффициент, связанный с эффективностью использования импульсов и отражающий долю рабочих импульсов в общем числе подаваемых в единицу времени импульсов напряжения.

Коэффициент k_m определяет электроэрози-

онную обрабатываемость материала. Значения данного коэффициента определяются экспериментально в конкретных условиях обработки. В достаточно узком диапазоне энергий разряда, когда изменением формы единичной разрядной лунки можно пренебречь, его можно выразить как отношение среднего объема единичной лунки $V_{л}$ к средней энергии разрядного импульса $W_{и}$.

Для оценки этого коэффициента разработана методика проведения эксперимента и выполнен анализ результатов обработки стали 12Х18Н10Т разрядными импульсами малой длительности.

Экспериментальные исследования проводили на электроэрозионном прошивочном станке модели ЭП310П, обеспечивающем обработку в диапазоне электрических параметров режима, приведенных в табл. 1. Станок предназначен для прошивки отверстий диаметром 0,1...3,0 мм и обеспечивает функцию подачи единичного импульса напряжения на межэлектродный промежуток.

1. Электрические параметры режима обработки

Наименование параметра	Значение
Напряжение между электродами, В	20...200
Ток обработки, А	1,0...15
Длительность импульса, мкс	1,0...30
Частота следования импульсов, кГц	1,0... 100
<i>Примечание:</i> Рабочая жидкость – вода.	

Количественная оценка мощности разрядного импульса производилась графическим интегрированием с использованием осциллограмм тока и напряжения, полученных с применением осциллографа фирмы Tektronix модели TDS 2012C и специального шунта.

Суть графического интегрирования сводится к разбивке осциллограмм на n равных временных участков Δt . Для каждого из участков графически определялись средний ток ($I_{ср, i}$) и среднее напряжение ($U_{ср, i}$), а энергия разрядного импульса находилась суммированием.

Для получения единичной лунки полированный образец ($Ra = 0,08$ мкм) помещали в рабочую зону станка. Латунный электрод-инструмент диаметром 0,7 мм с помощью щупа (набор № 2 ГОСТ 882-75) подвели к образцу, обеспечивая зазор 0,02 мм. Далее накладывали единичный импульс с напряжением холостого хода 200 В и длительностью, выбираемой в диапазоне 1,0...30 мкс. Данную операцию повторяли 3–5 раз для получения средних значений.

Измерение геометрических параметров лунок проводилось на микроскопе Olympus VХ 51 с использованием его программных функций. Глубину лунки принимали как разность координат положений объектива микроскопа при фокусировке на поверхности образца и на доннышке лунки. Фотографии типичных единичных эрозионных лунок представлены на рис. 1.

Для оценки объема лунки использовалась модель объема шарового сегмента. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 2, а также на рис. 2 и 3.

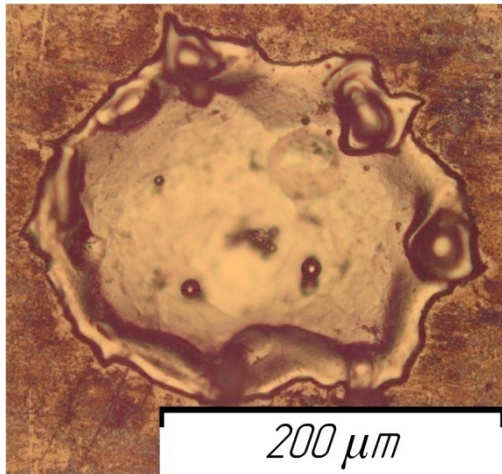
Рассмотрим зависимости энергетических характеристик разряда от длительности импульса (рис. 2).

Как видно, зависимости средних значений напряжения (кривая 2) и тока (кривая 3) в импульсе от длительности импульса имеют экстремум, а энергия импульса зависит от его длительности по закону, близкому к параболическому.

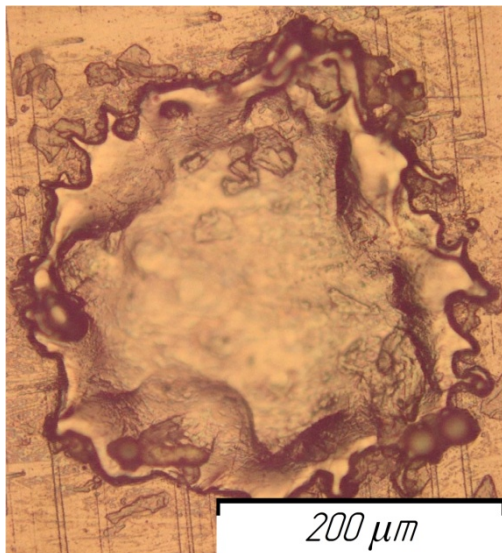
При наложении на межэлектродный промежуток (МЭП) импульса напряжения происходит его рост до величины, необходимой для пробоя. После пробоя напряжение на МЭП начинает падать с крутым фронтом до величины напряжения горения дуги 20...25 В. При длительности импульса $\tau_{и} > 10$ мкс дуговая (низковольтная) часть импульса начинает превалировать над искровой (высоковольтной), при расчете среднего напряжения.

2. Результаты экспериментов

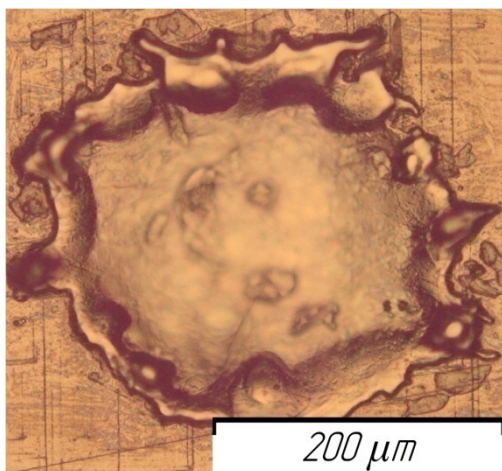
Параметр	Значения величин					
	2,0	5,0	10	15	20	30
Длительность импульса, мкс						
Энергия импульса, мкДж	275	1056	–	2620	–	3342
Средний ток в импульсе, А	5,5	7,7	–	6,4	–	5,2
Среднее напряжение импульса, В	26,8	32,5	–	26,2	–	25,8
Объем лунки, 10^{-5} мм ³	1,2	7,1	13,7	–	17,8	22,1
Диаметр лунки, мкм	74	153,5	214,3	–	216,5	214,3
Глубина лунки, мкм	6,7	9	9	–	11,3	14,3
Отношения диаметра к глубине	11,1	17,1	23,8	–	19,1	15



$\tau_{и} = 5 \text{ мкс}$; $W_{и} = 1700 \text{ мкДж}$;
 $d_{л} = 142 \text{ мкм}$; $h_{л} = 9 \text{ мкм}$;
 $V_{л} = 61 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3$



$\tau_{и} = 20 \text{ мкс}$; $W_{и} = 5000 \text{ мкДж}$;
 $d_{л} = 216 \text{ мкм}$; $h_{л} = 10 \text{ мкм}$;
 $V_{л} = 156 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3$



$\tau_{и} = 30 \text{ мкс}$; $W_{и} = 5500 \text{ мкДж}$;
 $d_{л} = 220 \text{ мкм}$; $h_{л} = 14 \text{ мкм}$;
 $V_{л} = 226 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3$

Рис. 1. Фотографии единичных лунок

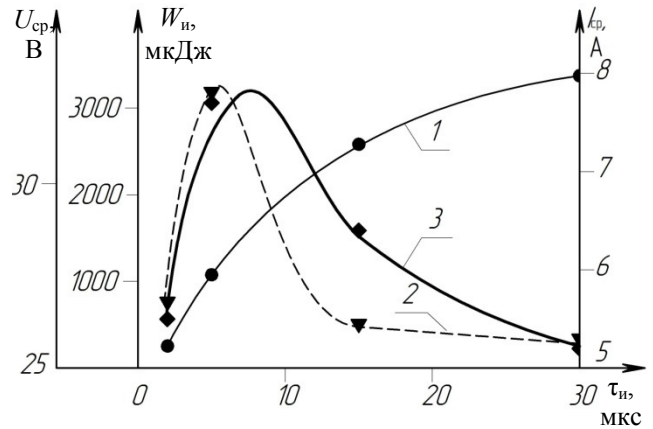


Рис. 2. Зависимости энергетических характеристик разряда от длительности импульса:

1 – энергия импульса; 2 – среднее напряжение в импульсе; 3 – средний ток в импульсе

Средний ток возрастает с длительностью импульса (кривая 3) в связи с изменением сопротивления плазменного столба вплоть до достижения его максимального диаметра, а затем начинает снижаться. При достаточно большой длительности импульса, когда влияние искровой стадии разряда становится несущественным, энергия импульса (кривая 1) прямо пропорциональна его длительности и зависимость, близкая к параболической, становится близкой к линейной.

Зависимости геометрических параметров лунки от энергии импульса представлены на рис. 3. Анализируя зависимости 3 и 4 можно заключить, что при длительности импульса до 10 мкс наблюдается преобладающий рост диаметра лунки, в то время как при длительности импульса 10...30 мкс преобладает увеличение глубины лунки. Отношение $d_{л}/h_{л}$ сначала быстро возрастает (кривая 2), а затем проходит через экстремум с последующим снижением.

Данную особенность можно объяснить тем, что при малых длительностях импульса лунка формируется преимущественно по механизму испарения материала, в то время, как при больших длительностях импульса значительная доля объема лунки формируется в результате выброса материала в жидко-капельном состоянии.

Объем лунки, как и энергия импульса, зависит от длительности импульса по закону, близкому к параболическому (кривая 1). Сравнение кривых 1 (см. рис. 2 и 3) и выполненные расчеты показывают, что в условиях данного эксперимента подтверждается близкая к линейной зависимость объема лунки от

энергии импульса, т.е. $V_{л} \sim W_{и}$. Тогда в соответствии с (1) коэффициент пропорциональности представляет собой вышеупомянутый коэффициент электроэрозионной обрабатываемости:

$$k_m = \frac{V_{л}}{W_{и}}. \quad (2)$$

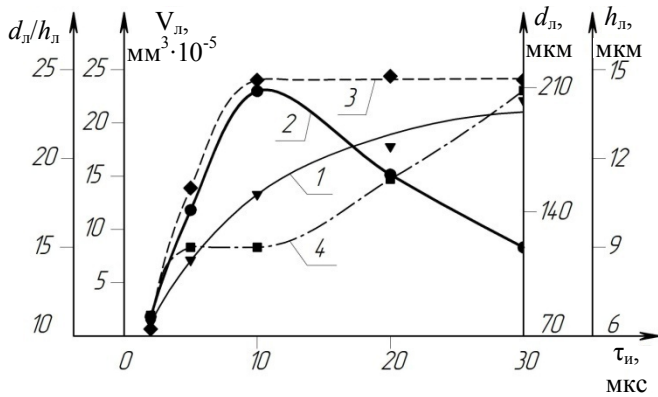


Рис. 3. Зависимости геометрических параметров лунки от длительности импульса:

1 – объём лунки; 2 – отношение диаметра к глубине; 3 – диаметр; 4 – глубина

Расчеты показали, что в наших условиях величина коэффициента обрабатываемости для стали 12X18H10T составляет $0,06 \text{ мм}^3/\text{Дж}$. Полученный результат можно использовать для обоснованного нормирования операции электроэрозионной микрообработки и прошивки отверстий диаметром менее $0,5 \text{ мм}$, с погрешностью $\pm 10 \%$ в диапазоне энергий импульса $250 \dots 3500 \text{ мкДж}$.

Выводы:

1. Показано, что при длительности разрядного импульса менее 10 мкс искровая стадия разряда существенно влияет на процесс электроэрозионного разрушения материала, что приводит к нелинейной зависимости энергии импульса и объема лунки от длительности импульса.

2. Наблюдается линейная взаимосвязь между объемом лунки и энергией разряда, характерная для длинных импульсов.

3. При длительности импульса менее 10 мкс геометрические параметры эрозионной лунки определяются преимущественно механизмом испарения материала.

4. Коэффициент электроэрозионной обрабатываемости для стали 12X18H10T при обработке импульсами малых энергий составляет $0,06 \text{ мм}^3/\text{Дж}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tao J. Modeling of the anode crater in electrical discharge machining / J. Tao, J. Ni, A.J. Shih // Trans ASME. J. Manuf. Sci. and Eng. – 2012. № 1, 134. – P. 1 - 11.

2. Ставицкий, Б.И. Из истории развития электроискровой обработки материалов / Б.И. Ставицкий. – Харьков: ЧФ «ЦентрИнформ», 2013. – 104 с.

3. Гудкова, О.С., Блинова, Т.А. Анализ методов получения малых отверстий в деталях из нержавеющей стали // Международная научно-техническая конференция «Исследования и инновации в ВУЗе», г. Белгород, 2012: Сборник докладов. – 2012. Ч. 2. С. 320 – 323.

4. Научные технологии машиностроительного производства. Физико-химические методы и технологии: учеб. пособие / Ю.А. Моргунов, Д.В. Панов, Б.П. Саушкин, С.Б. Саушкин / Под ред. Б.П.Саушкина. – М.: Форум, 2013. – 928 с.

5. Елисеев, Ю.С., Саушкин, Б.П. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / под ред. Саушкина Б.П. – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2010. – 437 с.

REFERENCES

1. Tao J. Modeling of the anode crater in electrical discharge machining / J. Tao, J. Ni, A.J. Shih // Trans ASME. J. Manuf. Sci. and Eng. – 2012. № 1, 134. – P. 1 - 11.

2. Stavitsky, B.I. *From History of Material Spark Machining* / B.I. Stavitsky. – Kharkov: ChF “CenterInform”, 2013. – pp. 104.

3. Gudkova, O.S., Blinova, T.A. Analysis of methods for manufacturing small holes in stainless steel parts // *The Inter. Scientific-Tech. Conf. “Investigations and Innovations in College”*, Belgorod, 2012: Proceedings. – 2012. Part 2. pp. 320 – 323.

4. *Science Intensive Techniques of Engineering Production. Physico-Chemical Methods and Techniques: Textbook* / Yu.A. Morgunov, D.V. Panov, B.P. Saushkin, S.B. Saushkin / under the editorship of B.P. Saushkin. – M.: Forum, 2013. – pp. 928.

5. Yeliseev, Yu.S., Saushkin, B.P. *Electro-erosion Treatment of Parts of Aero-space Engineering* / under the editorship of B.P. Saushkin – M.: Publishing House of Bauman STU of Moscow, 2010. – pp. 437.

Рецензент д.т.н. А.С. Калашиников