

# Электроэрозионная прошивка отверстий малого диаметра при наложении ультразвука.

## Часть 1. Результаты технологических экспериментов

А. А. Груздев, \*Ю. А. Моргунов, Б. П. Саушкин

Московский политехнический университет,  
г. Москва, 107023, Россия, \*e-mail: [morgunov56@mail.ru](mailto:morgunov56@mail.ru)

Поступила 29.08.2018

После доработки 22.10.2018

Принята к публикации 22.10.2018

Рассмотрены различные аспекты влияния ультразвукового поля на технологические характеристики операции электроэрозионной прошивки отверстий малого диаметра. Установлено повышение стабильности процесса прошивки при наложении ультразвука, выражающаяся в существенном снижении поля рассеяния значений машинного времени обработки. Выполнена количественная оценка эффекта повышения производительности и показано влияние различных факторов на его величину. Продемонстрировано воздействие ультразвуковых колебаний на точность размеров и шероховатость поверхности. Уточнена область эффективного применения операций электроэрозионной прошивки отверстий с наложением ультразвука.

*Ключевые слова:* отверстия малого диаметра, электроэрозионная прошивка отверстий, наложение ультразвука, технологические характеристики.

УДК 621.9.048

DOI: 10.5281/zenodo.2551236

ВВЕДЕНИЕ

В 70-80-х годах прошлого века выполнены первые технологические исследования влияния наложения ультразвука на процессы электрической эрозии материалов [1–4]. Показано, что наложение ультразвукового поля на технологическую систему приводит к заметному повышению производительности при электроэрозионной прошивке отверстий малого диаметра.

В последние годы вновь проявляется интерес к данным технологиям, главным образом в связи с проблемой обработки микроотверстий [5–9]. В работе [10] проведен обзор основных тенденций развития данного направления исследований. Выполнены работы, в которых делаются попытки обосновать физический механизм влияния ультразвуковых колебаний на производительность и стабильность процесса формообразования [11–16]. Вместе с тем новые экспериментальные данные позволят повысить достоверность и адекватность физической модели влияния ультразвуковых колебаний на протекание процесса электроэрозионного разрушения материалов. Ниже приводятся результаты систематического экспериментального исследования влияния ультразвукового поля на технологические характеристики электроэрозионной прошивки отверстий малого диаметра применительно к решению актуальных задач создания

новых образцов авиационно-космической техники.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Авторами работ [1–4] и [7–9] при прошивке отверстий диаметром 0,1–0,5 мм ультразвуковые (УЗ) колебания накладывались на инструмент. Этот способ наложения УЗ колебаний имеет ряд недостатков [1]. Поэтому в наших исследованиях УЗ колебания с помощью магнитоэрозионного генератора и переходных элементов накладывали на оснастку с жестко закрепленной заготовкой.

Для экспериментов использовали электроэрозионный прошивочный станок ЭП310ПУ [6], а в качестве рабочей жидкости – воду. Образцы для экспериментальных исследований изготавливали из стали 12Х18Н10Т. Параметры режима обработки соответствовали рекомендованным для прошивки отверстий диаметром 0,35 мм [5, 6]: напряжение холостого хода  $U = 200$  В, длительность импульса  $\tau_{и} = 0,4–3$  мкс, частота следования эрозионных импульсов  $f = 5$  и  $26$  кГц, частота УЗ колебаний  $f_{уз} = 22$  кГц, амплитуда УЗ колебаний  $A = 5–10$  мкм. В качестве инструмента использовали калиброванную латунную проволоку диаметром  $d = \emptyset 0,3$  мм. Отверстия прошивали на глубину  $h = 0,4–5$  мм ( $h/d \sim 1–15$ ).

Время прошивки фиксировали с помощью программных функций станка и проводили сравнительный анализ времени прошивки при электроэрозионной обработке (ЭЭО) и электроэрозионной обработке с наложением ультразвуковых колебаний (ЭЭОНУ).

В работе использован транзисторный генератор импульсов с широким диапазоном регулирования параметров импульса: частота следования импульсов – 1–100 кГц, напряжение на электродах – 20–200 В, средняя сила тока – 1–15 А, длительность импульсов – 0,5–30 мкс.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки достоверности и воспроизводимости результатов экспериментов при прочих равных условиях проведена прошивка двух партий по 50 отверстий в каждой с использованием ЭЭО и ЭЭОНУ соответственно. Отверстия прошивали на глубину 2 мм при длительности разрядного импульса  $\tau_{и} = 2,1$  мкс, частоте следования импульсов 5 кГц и энергии импульса 4 мДж. Результаты статистической обработки времени прошивки отверстий представлены на рис. 1.

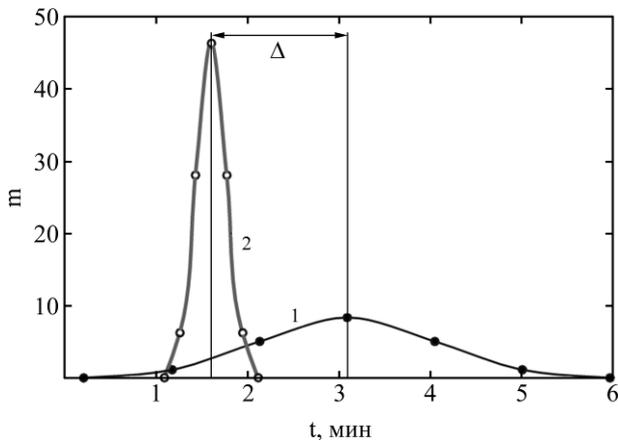


Рис. 1. Статистический анализ времени обработки: 1 – ЭЭО; 2 – ЭЭОНУ.

Ближкий к гауссовскому характер распределения значений времени обработки подтверждает тот факт, что процесс эрозионной прошивки протекает в условиях воздействия на него большого количества случайных факторов примерно равной значимости.

Среднеквадратичное отклонение значений времени обработки при ЭЭО составляет  $\sigma = 0,96$  мин, а с наложением УЗ колебаний –  $\sigma = 0,17$  мин, что примерно в 5,6 раза меньше. Из этого следует, что наложение УЗ колебаний приводит к существенному повышению стабильности процесса прошивки отверстий. Это, по-видимому, вызывается интенсификацией эвакуации продуктов эрозии, выравниванием в связи с этим свойств рабочей среды в предраз-

рядный период и соответственно стабилизацией частоты рабочих импульсов в процессе обработки.

В пользу этого предположения свидетельствуют результаты анализа осциллограмм разрядного тока и напряжения, которые позволили оценить частоту рабочих импульсов при ЭЭО и ЭЭОНУ (рис. 2).

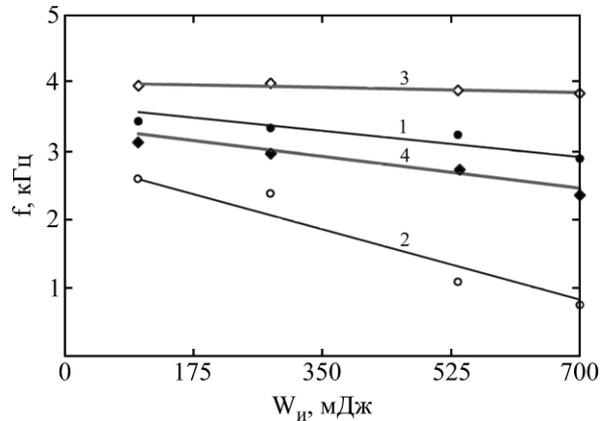


Рис. 2. Зависимость частоты следования рабочих импульсов от энергии импульса при ЭЭО (1, 2) и ЭЭОНУ (3, 4) при глубине прошивки 0,4 мм (1, 3) и 4 мм (2, 4).

Графики построены по 3-кратной выборке 100 импульсов в моменты времени, соответствующие глубине прошивки 0,4 и 4 мм соответственно. Видно, что наложение УЗ колебаний способствует увеличению частоты рабочих импульсов при отношениях глубины отверстия к диаметру 1:10.

Смещение центра рассеяния значений машинного времени обработки (рис. 1) указывает на повышение теоретической производительности процесса (величина, обратная машинному времени) при наложении ультразвукового поля.

Для подтверждения сказанного экспериментально установлено влияние различных факторов на эффективность снижения значений машинного времени обработки при наложении ультразвука. На рис. 3а показано влияние глубины обрабатываемого отверстия на эффект снижения машинного времени при сравнении ЭЭО (1) и ЭЭОНУ (2) ( $\tau_{и} = 2$  мкс,  $W_{и} = 4$  мДж,  $f = 5$  кГц).

Видно, что зависимость времени обработки от глубины отверстия при ЭЭО, начиная с некоторого значения глубины, становится нелинейной, а скорость прошивки снижается, тогда как при ЭЭОНУ эта зависимость сохраняет в условиях эксперимента линейный характер. Из этого следует, что наложение УЗ колебаний способствует эффективной эвакуации продуктов эрозии из межэлектродного промежутка (МЭП), вследствие чего линейная скорость эрозии до определенной глубины прошивки изменяется незначительно. Кроме того, установлено, что наложение

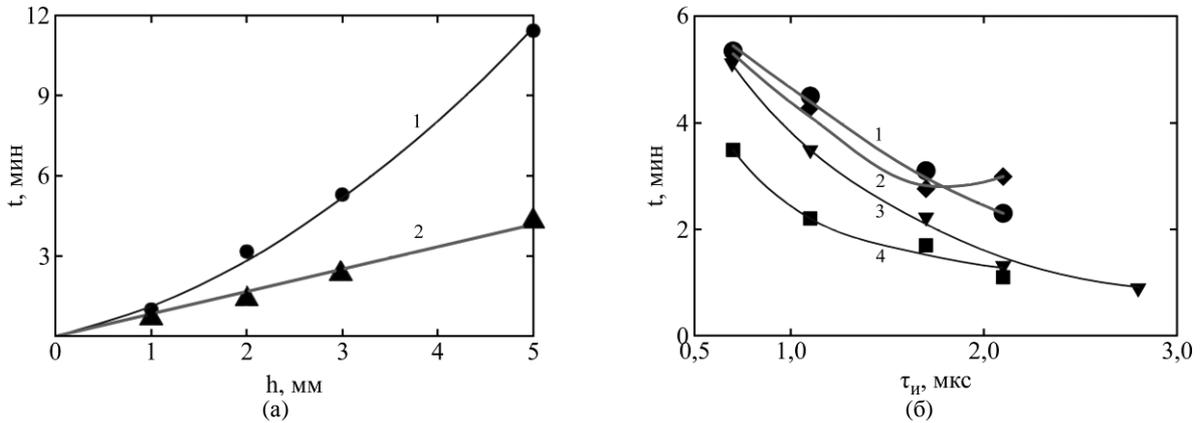


Рис. 3. Влияние глубины прошивки (а) и длительности импульсов (б) на машинное время обработки.

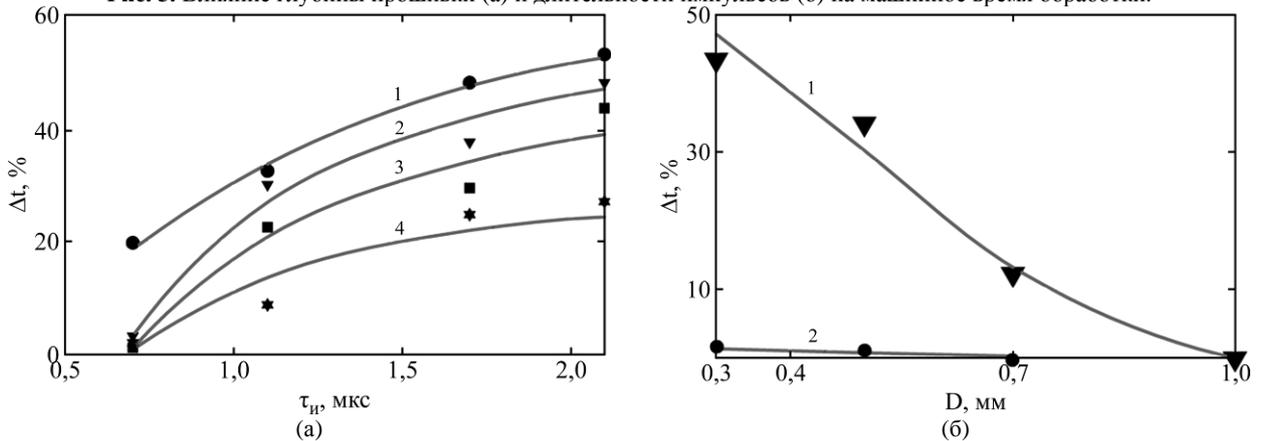


Рис. 4. Зависимости относительного снижения времени прошивки от длительности импульса (а) (при глубине прошивки, мм: 1 – 5; 2 – 3; 3 – 2; 4 – 1) и от диаметра прошиваемого отверстия (б) (длительность импульса, мкс: 1 – 2,1; 2 – 0,7).

УЗ колебаний дает возможность работать на более производительных режимах ( $\tau_n$  более 3 мкс), чем при ЭЭО.

На рис. 3б представлены зависимости машинного времени обработки от длительности импульса при частотах следования разрядных импульсов 5 (кривые 1 и 3) и 26 (кривые 2 и 4) кГц (глубина прошивки 2 мм, напряжение на электродах 200В) для ЭЭО (кривые 1 и 2) и ЭЭОНУ (кривые 3 и 4).

Видно, что с увеличением частоты следования импульсов при ЭЭО наблюдается лишь небольшое снижение времени обработки (повышение производительности), а при  $\tau_n = 2,1$  мкс и вовсе обратный эффект. Это связано с тем, что при данном режиме обработки скорость генерации продуктов эрозии начинает превышать скорость естественной эвакуации, и вследствие этого происходит снижение производительности. Наложение УЗ колебаний приводит к увеличению скорости эвакуации продуктов эрозии, и производительность при  $\tau_n = 0,7-1,2$  мкс возрастает примерно в 1,5 раза.

На рис. 4 показаны зависимости относительного снижения времени прошивки  $\Delta t$  от длительности импульса и диаметра прошиваемого отверстия, причем  $\Delta t$  находили по выражению:

$$\Delta t = \left( 1 - \frac{t_{уз}}{t_{пр}} \right) \cdot 100\%,$$

где  $t_{пр}$  – время прошивки при ЭЭО;  $t_{уз}$  – время прошивки при ЭЭОНУ.

Как видно,  $\Delta t$  возрастает как с увеличением длительности импульса, так и при увеличении глубины прошивки (рис. 4а). При малой длительности импульса (в наших условиях  $\tau_n = 0,7$  мкс) увеличение производительности прошивки при глубине отверстия 1–3 мм не наблюдается (кривые 2–4). Это, вероятно, связано с относительно низким количеством продуктов эрозии, генерируемых в единицу времени, при котором газопаровой пузырь (естественная эвакуация) успешно справляется с очисткой МЭП. Дополнительная интенсификация вывода продуктов эрозии не требуется.

Однако при глубине 5 мм (кривая 1) естественная эвакуация уже недостаточна, и наложение УЗ поля снижает время обработки на 20%.

Для определения области эффективного применения ЭЭОНУ проведены экспериментальные исследования зависимости времени прошивки при ЭЭО и ЭЭОНУ от диаметра отверстия в

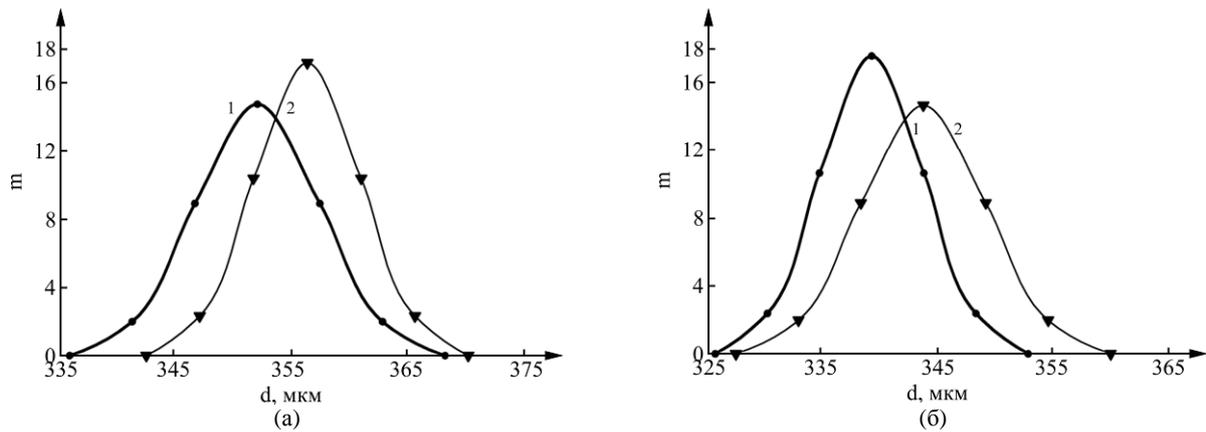


Рис. 5. Статистический анализ входных (а) и выходных (б) диаметров отверстий: 1 – ЭЭО; 2 – ЭЭОНУ.

диапазоне диаметров 0,3–1,0 мм (при глубине прошивки 2 мм, длительности импульсов,  $\tau_{и} = 0,7$  и 2,1 мкс, напряжении на электродах 200 В и частоте следования импульсов 5 кГц). Результаты показаны на рис. 4б в виде зависимостей относительного снижения времени прошивки от диаметра отверстия.

Наибольшее снижение времени обработки при наложении УЗ колебаний наблюдается при работе на большей длительности импульса при прошивке отверстий меньшего диаметра. Так, при прошивке отверстия диаметром 0,35 мм и длительности импульса 2,1 мкс снижение времени обработки при наложении УЗ колебаний составляет 45%. При длительности импульса 0,7 мкс эффект наложения УЗ колебаний практически не заметен.

Таким образом, эффективной областью применения ЭЭОНУ является прошивка отверстий диаметром менее 0,7–0,8 мм при отношении глубины отверстия к диаметру более 5.

Для оценки влияния наложения ультразвука на точность изготовления отверстий производились ЭЭО и ЭЭОНУ двух партий отверстий диаметром 0,35 мм и глубиной 2 мм при одинаковых параметрах режима разряда:  $\tau_{и} = 2$  мкс,  $W_{и} = 4$  мДж,  $U = 200$  В и  $f = 5$  кГц. Проводились измерения размеров отверстий на входе и выходе инструмента с помощью инструментального микроскопа и статистическая обработка результатов измерений (рис. 5).

Данные графики имеют практически одинаковое поле рассеяния как входных (среднеквадратичное отклонение при ЭЭО  $\sigma = 5,42$  мкм, при ЭЭОНУ  $\sigma = 4,64$  мкм), так и выходных (при ЭЭО  $\sigma = 4,54$  мкм, при ЭЭОНУ  $\sigma = 5,44$  мкм) диаметров отверстий. Однако наложение УЗ колебаний способствует смещению центра рассеивания диаметров в сторону увеличения при сравнении с ЭЭО. Это означает, что УЗ колебания приводят к разбивке отверстий (около 5 мкм на диаметр) без заметных изменений

геометрической формы в поперечном сечении. Это необходимо учитывать при проектировании операций ЭЭОНУ прецизионных отверстий.

Судя по данным рис. 5, формируется некоторая конусность в продольном сечении отверстия, так как разности диаметров (средние значения) на входе и выходе инструмента не одинаковы. Отметим, что такая конусность характерна как для ЭЭО, так и для ЭЭОНУ.

Для анализа влияния наложения УЗ колебаний на шероховатость поверхности производили ЭЭО и ЭЭОНУ образцов при тех же параметрах режима с последующим измерением показателя шероховатости  $R_a$ . На рис. 6 представлены зависимости этого показателя от длительности импульса.

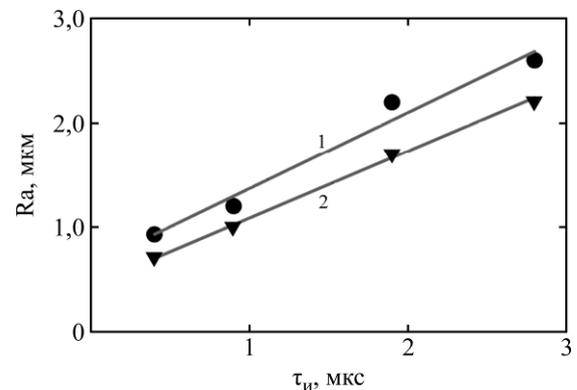


Рис. 6. Зависимость параметра  $R_a$  шероховатости поверхности от длительности импульса при ЭЭО (1) и ЭЭОНУ (2).

Видно, что полученные зависимости в диапазоне  $\tau_{и} = 0,4$ –2,7 мкс имеют характер, близкий к линейному и практически одинаковый угол наклона к оси абсцисс. Наложение УЗ колебаний приводит к снижению показателя шероховатости поверхности примерно на 20%. Это объясняется уменьшением частоты импульсов короткого замыкания, способствующих появлению прижогов, формированию более грубого микро-рельефа и соответствующему повышению шероховатости поверхности. Этот вывод следует из анализа соответствующих профилограмм микро-геометрии поверхности.

Наличие дефектного слоя (микротрещин, инородных включений) выявить не удалось из-за малых энергий разрядных импульсов и, как следствие, малой толщины дефектного слоя.

### ВЫВОДЫ

1. Результаты экспериментов подтвердили возможность повышения производительности операции прошивки отверстий малого диаметра при наложении УЗ колебаний, позволили получить количественную оценку наблюдаемого эффекта и выявить область его эффективного практического применения. Так, при прошивке отверстия  $\varnothing 0,35$  при прочих равных условиях наложение УЗ колебаний приводит к снижению машинного времени обработки на 55% при параметрах режима обработки:  $\tau_{и} = 2,1$  мкс,  $f = 5$  кГц,  $U = 200$  В.

2. Установлено, что УЗ колебания способствуют повышению стабильности процесса прошивки, сужению поля рассеяния времени обработки. Так, при прошивке отверстия  $\varnothing 0,35$  мм при параметрах режима обработки:  $\tau_{и} = 2,1$  мкс,  $f = 5$  кГц,  $U = 200$  В поле рассеяния уменьшилось в 5,6 раза по сравнению с ЭЭО без наложения ультразвука.

3. Сделан вывод о том, что наблюдаемые эффекты повышения производительности и стабильности обработки являются следствием интенсификации эвакуации продуктов эрозии из разрядного промежутка под действием УЗ колебаний.

4. Установлено, что при ЭЭОНУ наблюдается некоторая разбивка отверстий с увеличением диаметра на несколько микрометров в результате поперечных колебаний инструмента при недостаточной жесткости технологической системы.

5. Вследствие повышения стабильности процесса прошивки и снижения относительного числа импульсов короткого замыкания наблюдается некоторое снижение шероховатости поверхности при ЭЭОНУ, которое в наших экспериментах достигало 20% величины шероховатости при ЭЭО.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кавтарадзе О.Н. ЭОМ. 1984, (4), 70–73.
2. Кавтарадзе О.Н., Липчанский А.Б. ЭОМ 1990, (2), 3–5.
3. Мицкевич М.К., Бушин А.И., Бакуто И.А. и др. *Электроэрозионная обработка материалов*. Минск: Наука и техника, 1988. 286 с.

4. Kremer D., Lebrun J.L., Hosari B., Moisan A. *CIRP Annals*. 1989, **38**(1), 199–202.
5. Белов И.И., Груздев А.А., Саушкин Б.П. *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2012, **2**(2), 77–83.
6. Груздев А.А., Королев А.Н., Селивестров А.В., Моргунов Ю.А. *Технология машиностроения*. 2016, (3), 29–32.
7. Cusanelli G., Burgener M., Ammann W., Grize P-E. et al. *Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Symposium on Electromachining (ISEM-XVI)*. Shanghai, China, 19–23 April 2010, pp. 523–530. <http://cpfd.cnki.com.cn/>
8. Schorderet A., Berthier Y., Preneloup A., Kremer D. et al. *Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Symposium on Electromachining (ISEM-XVI)*. Shanghai, China, 19–23 April 2010, pp. 571–576. <http://cpfd.cnki.com.cn/>
9. Yan B.H., Wang A.C., Huang C.Y., Huang F.Y. *Int J Mach Tool Manufact.* 2002, **42**, 1105–1112.
10. Sanjay Kumar, Sandeep Grover, Walia R.S. *Int J Precision Technology*. 2017, **7**(1), 51–84.
11. Liu Y., Chang H., Zhang W., Ma F. et al. *Micromachines*. 2018, **9**(8), 378.
12. Lin Y.C., Hung J.C., Lee H.M., Wang A.C. et al. *Int J Adv Manuf Technol*. 2017, **92**, 2801–2808.
13. Deng Z.Q., Zhu Y.W., Wang F., Gu X. et al. *Strength of Materials*. 2017, **49**, 37–44.
14. Hao Ni., Gong Hu., Dong Y.H., Fang F.Z. et al. *Int J Adv Manuf Technol*. 2018, **95**, 1465–1472.
15. Nowicki R., Świercz R., Oniszczuk-Świercz D., Dąbrowski L. et al. *AIP Conference Proceedings 2017*. 2018, ID 020019. doi: 10.1063/1.5056282.
16. Liao Y.S., Liang H.W. *Procedia CIRP*. 2016, **42**, 552–556.

### Summary

Various aspects of the ultrasonic field influence on technological characteristics of electrodischarge drilling of small diameter holes are considered. The process stability increase at the ultrasonic field application is found and a decrease of the machining time values spread is shown. A quantitative estimation of the productivity increasing effect is carried out and the influence of various parameters on this effect is discussed. The impact of ultrasonic oscillations on the process accuracy and surface roughness is reported. The sphere of an effective application of the electrodischarge drilling technology under ultrasonics is refined.

**Keywords:** small diameter holes, electrodischarge drilling, ultrasonic field application, technological characteristics.