

DOI: 10.12737/article\_590878fb688f07.37604549

Бойко А.Ф., д-р техн. наук, проф.,  
Клеймёнов К.Н., магистрант,  
Чунихин А.Б., студент

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА И ИЗНОСА ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА ОТ ЧАСТОТЫ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ПРОШИВКЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ МИКРООТВЕРСТИЙ

maytobigeri@yandex.ru

В статье изложены результаты исследований производительности процесса и износ электрода-инструмента от частоты импульсов электроэрозионной прошивки микроотверстий диаметром  $D=0,01-0,2$  мкм. Получены математические модели зависимости, на основе которых оптимизированы режимы обработки. Установлено, что для каждого диаметра электрода-инструмента и каждой глубины отверстия существует оптимальное значение частоты. Результаты оптимизации табулированы.

**Ключевые слова:** износ электрода-инструмента, оптимальное значение частоты, математические модели.

**Введение.** Частота, как и энергия импульсов, является важнейшим параметром процесса электроэрозионной прошивки микроотверстий [1–4]. Оба параметра являются составляющими главной энергетической характеристики процесса – мощности, реализуемой в межэлектродном промежутке. Несмотря на то, что длительность импульсов составляет доли микросекунд, энергия, выделяемая в межэлектродном промежутке от единичного импульса, оказывается достаточной, чтобы в канале разряда температура достигла десятков тысяч градусов. При такой температуре плавятся и испаряются все материалы, поэтому короткие импульсы пригодны для обработки любых токопроводящих материалов. С увеличением частоты импульсов количество эродированных частиц в единицу времени будет увеличиваться, и производительность обработки расти. Однако, как и в случае с энергией импульсов, с увеличением частоты импульсов растет доля парогазовой фазы в межэлектродном промежутке, уменьшается эвакуационная способность процесса, растет доля «фиктивных» импульсов и вторичных разрядов, расходуемых на повторное диспергирование частиц. При этом замедляется рост производительности прошивки микроотверстий, нарушается его стабильность, увеличивается износ электрода-инструмента и, следовательно, снижается точность обработки. Таким образом, и в отношении частоты импульсов стоит исследовательская задача оптимизации.

Для исследования был проведен ряд экспериментов на электроэрозионном станке 04ЭП10М. Электроэрозионная обработка осуществлялась с использованием транзисторного генератора коротких импульсов (а.с.№884923).

В качестве электрода-инструмента использовалась омедненная вольфрамовая проволока, обрабатываемый материал – хромоникелевые стали типа 12Х18Н10Т, 3И-30. Эксперименты проводились на следующих режимах: глубина прошиваемого отверстия –  $H = 500$  мкм; частота вибрации электрода-инструмента  $f = 330$  Гц; амплитуда вибрации электрода инструмента – 12 мкм, энергия импульса  $E = 6,17; 9,25; 13, 18$  мкДж.

**Методология.** Эксперимент проводился следующим образом. Прошивка отверстия производилась тремя различными по диаметру  $d$  электродами-инструментами – 20 мкм, 30 мкм и 50 мкм. Для каждого диаметра электрода-инструмента прошивалось  $n = 4$  отверстия со следующими значениями частоты импульсов  $f_1=25$  кГц,  $f_2=33$  кГц,  $f_3=50$  кГц,  $f_4=100$  кГц. При прошивке замерялось время прошивки  $t$  и измерялся износ электрода-инструмента  $Z$ .

**Основная часть.** На рис. 1 представлены графики зависимости относительного линейного износа  $\gamma$  электрода-инструмента (%) от частоты  $f$  импульса при  $E = 9.25$  мкДж для трёх диаметров электрода-инструмента.

Полученные графики можно описать графоаналитическим методом с помощью математических функций в виде:

$$\gamma(d, f) = \frac{-1,072}{d^{-1,365} - 0,025} \cdot (1 - e^{-\frac{f}{0,42d - 9,555}}), \quad (1)$$

где  $f$  – частота импульса, кГц;  $d$  – диаметр электрода инструмента, мкм.

Максимальная погрешность при описании данных математическими функциями в интересующих нас точках не превышает 10 %.

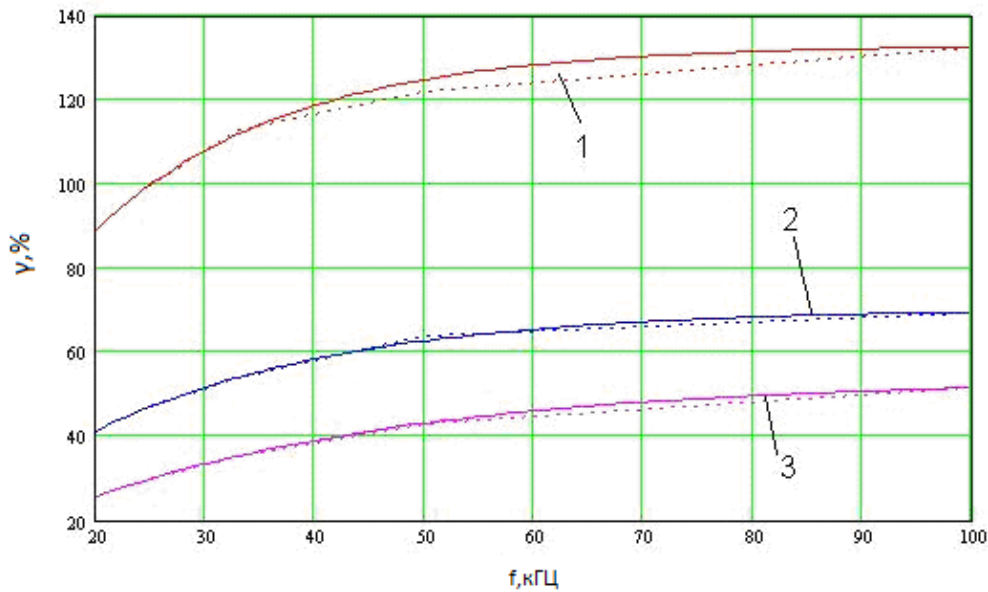


Рис. 1. Графики зависимости износа электрода-инструмента от частоты импульса:  
 1 – для электрода-инструмента диаметром  $d=20$  мкм; 2 –  $d=30$  мкм;  
 3 –  $d=50$  мкм (сплошные линии – экспериментальные, пунктирные – теоретические)

На рис. 2 представлен объемный график зависимости относительного линейного износа от диаметра электрода-инструмента и частоты импульсов.

Видно, что малый износ электрода-инструмента наблюдается при малой частоте импульса, и в этом диапазоне частот износ не-

значительно зависит от диаметра электрода. В диапазоне больших частот импульсов наблюдается резкое увеличение износа для малых диаметров электродов-инструментов, что говорит о необходимости оптимизации частоты импульса как одного из важных параметров процесса электроэрозионной обработки.

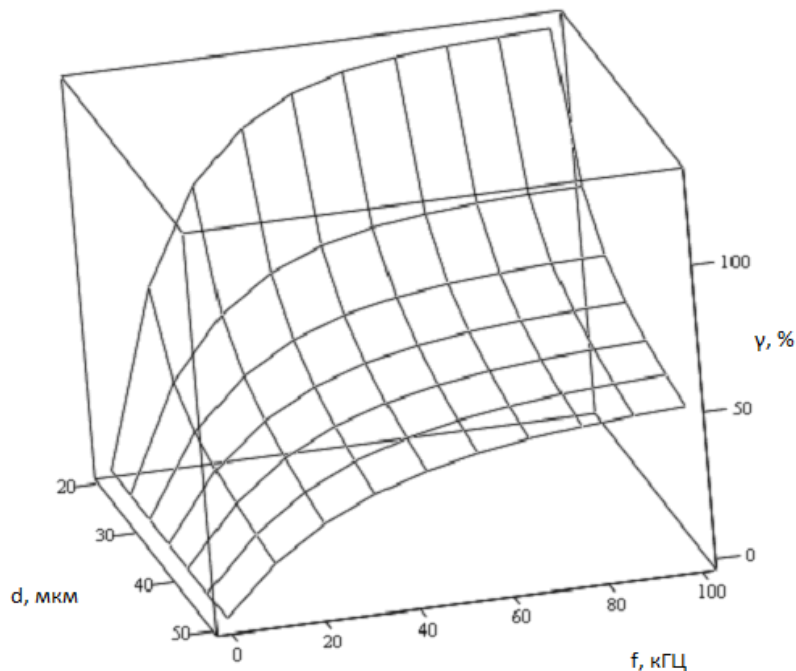


Рис. 2. График зависимости линейного износа от диаметра электрода-инструмента и частоты импульсов

На рис. 3 представлены графики зависимости производительности  $Q$  (мкм/сек) от частоты

импульса для трёх диаметров электродов-инструментов.

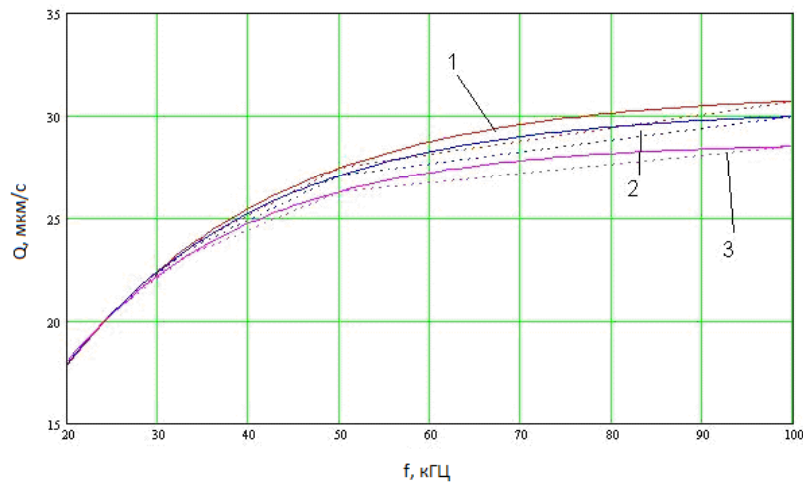


Рис. 3. Графики зависимости производительности от частоты импульса: 1 – для электрода-инструмента диаметром 20 мкм; 2 – 30 мкм; 3 – 50 мкм (сплошные линии – экспериментальные, пунктирные – теоретические)

Семейство этих графиков для разных диаметров электродов-инструментов можно описать графоаналитическим методом математически в виде функции:

$$Q(d, f) = (-0,08 \cdot d + 32,76) \cdot (1 - e^{\frac{f}{0,11 \cdot d - 25,7}}), \quad (2)$$

где  $f$  – частота импульсов, кГц;  $d$  – диаметр электрода-инструмента, мкм.

Максимальная погрешность при описании данных математическими функциями в интересующих нас точках не превышает 10 %.

На рис. 4 представлен объемный график зависимости производительности от диаметра электрода-инструмента и частоты импульсов.

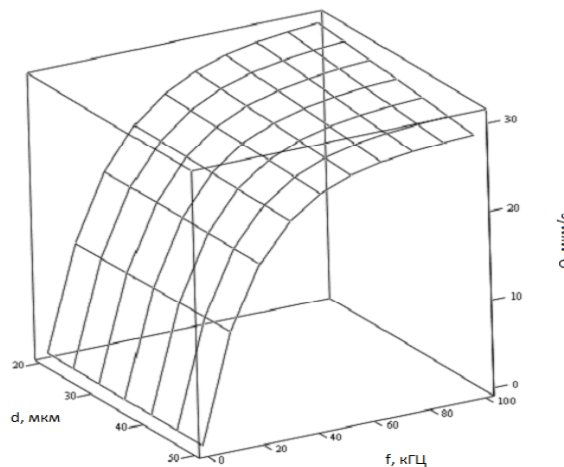


Рис. 4. График зависимости производительности от диаметра электрода-инструмента и частоты импульсов

Видно, что интенсивный рост производительности наблюдается в области малых частот импульса, что объясняется малым количеством образованных в межэлектродном промежутке эродированных частиц, эвакуация которых не вызывает затруднений.

С увеличением частоты импульсов количество продуктов эрозии, образованных в единицу времени, увеличивается, самоэвакуация их из

межэлектродного промежутка все более затрудняется, следствием чего является снижение темпов роста производительности.

На базе проведенных экспериментов были получены трёхфакторные зависимости относительно линейного износа  $\gamma$  электрода-инструмента и производительности  $Q$  от диаметра  $d$ , глубины  $H$  отверстия и частоты  $f$  импульсов

$$\gamma(d, H, f) = \left(\frac{0,23 \cdot d}{H} \cdot \left(e^{\frac{H}{23 \cdot d}} - 1\right) + \frac{12,824}{d^{0,212 - 1,761}}\right) \cdot (1,51 - 1,51 \cdot e^{-0,045 \cdot f}), \quad (3)$$

$$Q(d, H, f) = (0,5 \cdot H \cdot (0,0009 \cdot d - 0,093) + 0,435 \cdot d + 21,8) \cdot (1,28 - 1,28 \cdot e^{-0,045 \cdot f}). \quad (4)$$

Тогда оперативное время обработки (4.18) будет иметь вид:

$$T_{оп}(d, H, f) = \frac{H}{(0,5 \cdot H \cdot 0,0009 \cdot d - 0,093) + 0,435 \cdot d + 21,8} \cdot (1,28 - 1,28 \cdot e^{-0,045 \cdot f}) + \frac{(25+10) \cdot \left( \frac{0,23 \cdot d}{H} \left( e^{\frac{H}{2,3 \cdot d}} - 1 \right) + \frac{12,824}{d^{0,212-1,761}} \right) \cdot (1,51 - 1,51 \cdot e^{-0,045 \cdot f}) \cdot H}{(33,75 \cdot d - H) \cdot 100} + t' \tag{5}$$

На рис. 5 представлен объемный график зависимости оперативной производительности  $Q_{оп} = \frac{H}{T_{оп}}$  от частоты импульса и глубины про-

шиваемого отверстия для трёх диаметров электродов-инструментов.

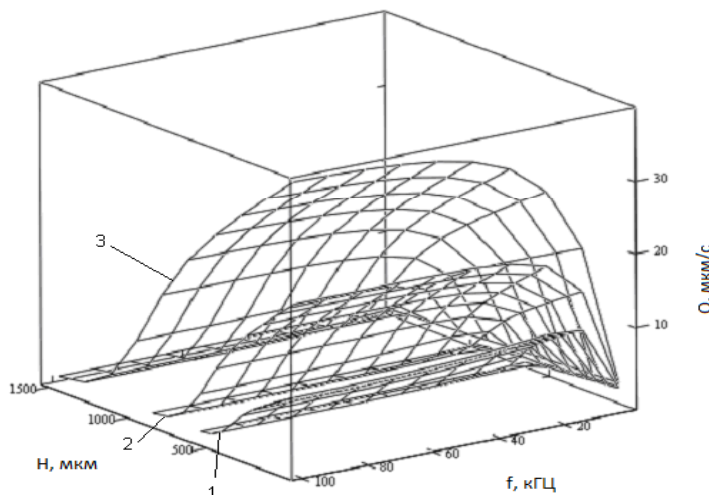


Рис. 5. Графики зависимости оперативной производительности от частоты импульсов и глубины прошиваемого отверстия:  
1 – для электрода-инструмента диаметром 20 мкм; 2 – 30 мкм; 3 – 50 мкм

Из графика видно, что для определенного диаметра электрода-инструмента и определенной глубины прошиваемого отверстия производительность увеличивается с увеличением частоты, но до определенного значения частоты производительность увеличивается резко, а затем незначительно. Следовательно, построив график оперативного времени для определенного диаметра электрода-инструмента и глубины прошиваемого отверстия можно определить оптимальную точку частоты генератора импульсов, после которой увеличение частоты будет

нецелесообразно, так как практически нет роста производительности, но увеличивается износ электрода-инструмента (см. рис. 1, 2), что негативно сказывается на точности обработки.

На рис. 6 представлен график зависимости времени прошивки от частоты генератора для электрода-инструмента диаметром 50 мкм и глубины прошиваемого отверстия 800 мкм. Из графика видно, что до частоты 40 кГц идет резкое снижение времени обработки, а после почти не происходит снижение времени обработки.

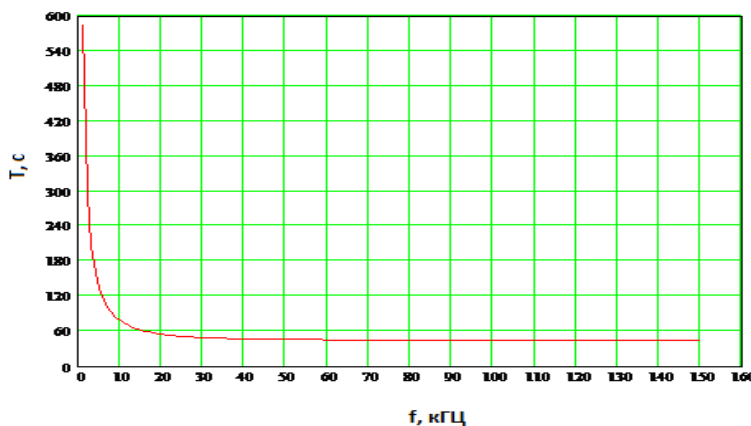


Рис. 6. Графики зависимости оперативного времени от частоты импульса для электрода-инструмента диаметром 50 мкм и глубины 800 мкм

В табл. 1 приведены некоторые значения оптимальных частот импульсов в зависимости от диаметра электрода-инструмента и глубины

прошиваемого отверстия, после которых увеличение частоты не целесообразно по вышеизложенным причинам.

Таблица 1

### Оптимальные частоты генератора импульсов

Глубина прошиваемого отверстия $H$ , мкм	Диаметр прошиваемого отверстия $d$ , мкм		
	20	30	50
1	2	3	4
100	25	35	60
200	25	35	55
300	20	30	50
400	15	25	50
500	10	25	40
600	8	20	40
700	-	10	40
800	-	5	35
900	-	3	30
1000	-	-	20

Прочерки в таблице обозначают такие глубины, на которых нецелесообразно производить прошивку из-за очень большого износа электрода-инструмента.

#### Выводы.

1. С увеличением частоты импульсов наряду с ростом производительности увеличивается износ электродов-инструментов, особенно в диапазоне малых диаметров. Наибольший рост производительности наблюдается в области малых частот.

2. В исследуемом диапазоне изменения частот импульсов экстремума зависимости относительно износа электрода-инструмента и производительности электроэрозионной прошивки микроотверстий от частоты импульсов не наблюдается.

3. Оптимальной частотой импульсов принято такое её наименьшее значение, дальнейшее увеличение которого не даёт заметного роста оперативной производительности, но увеличивает износ электрода-инструмента и, как следствие, снижает точность обработки. Таким образом, частотная характеристика процесса электроэрозионной прошивки микроотверстий имеет односторонний оптимум.

4. На основе односторонней оптимизации для каждого диаметра электрода-инструмента и каждой глубины прошиваемого микроотверстия получены оптимальные значения частот импульсов. С уменьшением диаметра и увеличением глубины микроотверстий оптимальное значение частоты уменьшается.

5. Разработанный метод оптимизации частоты импульсов является новым научным решением в технологии электроэрозионной прошивки микроотверстий и может быть использован при создании адаптивно-программного управления электрическими режимами обработки.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pusacheva E.I., Boyko A.F. Research of multiple-factor dependence of wear of an electrode tool and development of a technique of its optimization at an electroerosion of small openings // International Journal of Applied Engineering Research (IJAER). 2014. V. 9. №22. P. 16821-16836
2. Бойко А.Ф. Эффективная технология и оборудование для электроэрозионной прошивки прецизионных микроотверстий - Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. 314с.
3. Погонин А.А., Бойко А.Ф., Домашенко Б.В. Влияние энергии и частоты импульсов тока на производительность электроэрозионной обработки капиллярных отверстий//Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. докл. Пятая междунар. науч.-техн. конф. Брянск, 2006г./ Брянская гос. инж. - технол. акад.-Брянск, 2006. С. 133–136.
4. Погонин А.А., Бойко А.Ф., Блинова Т.А. Влияние энергии и частоты импульсов тока на качество поверхности капиллярных отверстий, полученных в результате электроэрозионной прошивки // Наука на рубеже тысячелетий: сб. мат-ов 5-й междунар. науч. - практ. конф., Там-

б-ов, 26-27 окт. 2008г./ ТГТУ. Тамбов, 2008. С. 157–159.

---

**Boyko A.F., Kleymenov K.N., Chunikhin A.B.**

**THE RESEARCH ON THE PROCESS PRODUCTIVITY AND WEAR OF THE TOOL ELECTRODE ON THE FREQUENCY OF THE PULSES OF THE ELECTROEROSIVE FLASHING OF MICROHOLES**

*The article presents the results of the research on the process productivity and wear of the tool electrode on the frequency of the pulses of the electroerosive flashing of microholes with a diameter  $D = 0.01-0.2 \mu\text{m}$ . It points out the obtained mathematical models of dependence, which provided the basis for the optimization of processing regimes. It is established that for each diameter of the tool electrode and each hole depth there is an optimal frequency value. The optimization results are tabulated.*

**Key words:** wear of the tool electrode, optimal frequency value, mathematical models.

---

**Бойко Анатолий Федорович**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: boyko\_1947@bk.ru

**Клейменов Кирилл Николаевич**, магистрант кафедры технологии машиностроения.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: kirill.kleymenov@mail.ru

**Чунихин Антон Борисович**, студент кафедры технологии машиностроения.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: maytoigeri@yandex.ru