

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-6-136-144

*\*Бойко А.Ф., Подпратов Д.В.*

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*\*E-mail: boyko\_1947@bk.ru*

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВУХ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ПРОШИВКИ ГЛУХИХ МИКРООТВЕРСТИЙ

**Аннотация.** Изложены результаты экспериментальных исследований значимости отличий технологических показателей электроэрозионной прошивки микроотверстий для двух вариантов технологического процесса прошивки серии микроотверстий: без торцовки электрода-инструмента и с торцовкой электрода-инструмента после обработки каждого отверстия. Установлена существенность различий технологических показателей процесса прошивки: по износу электрода-инструмента, по производительности процесса и эффективности процесса в целом. Для точной оценки значимости отличий двух вариантов технологического процесса электроэрозионной прошивки малых отверстий была выполнена детальная статистическая обработка данных двух выборок из восьми дублирующих (параллельных) опытов в каждой выборке. Для выявления и исключения из результатов эксперимента сомнительных опытов (артефактов), т.е. опытов с резко выделяющимися результатами, были произведены расчеты предельных значений параметров электроэрозионной прошивки микроотверстий: относительного линейного износа электрода-инструмента и производительности процесса. Результаты таких опытов из статистического ряда следует исключать, т.к. они оцутимо влияют на результаты эксперимента.

В работе использован точный метод определения необходимого количества дублирующих опытов, разработанный в БГТУ им. В.Г. Шухова. Проведенные исследования убедительно показывают целесообразность внедрения операции торцовки электрода-инструмента в производство для снижения износа электрода-инструмента и, следовательно, повышения качества изделий с глухими микроотверстиями, например, в массовое производство атравматических хирургических игл, объём производства которых составляет миллионы штук в год.

**Ключевые слова:** электроэрозионная прошивка, микроотверстие, электрод-инструмент, линейный износ, производительность, коэффициент эффективности.

**Введение.** Известно [1, 2], что при электроэрозионной прошивке (ЭЭП) малых отверстий проволочным электродом-инструментом (ЭИ) основной износ электрода идет по его рабочему торцу, в меньшей степени изнашивается боковая поверхность электрода, износ, который особенно заметен вблизи его рабочего торца. Это приводит к нарушению исходной цилиндрической формы ЭИ и, следовательно, к ухудшению точности формы получаемых глухих отверстий, а также к изменению других технологических показателей процесса: производительности, линейного износа ЭИ, эффективности процесса в целом.

Для исключения или существенного снижения этого негативного явления предлагается применять технологический прием: после прошивки каждого отверстия осуществлять торцовку ЭИ, то есть снимать на обратной полярности дефектную часть ЭИ, что безусловно приведет к изменению основных технологических показателей

процесса. Эта работа и посвящена сравнительному анализу двух методов ЭЭП глухих малых отверстий: прошивка без торцовки ЭИ и с торцовкой ЭИ после обработки каждого отверстия.

Прошивка микроотверстий производилась в заготовке из хромоникелевой стали ХВ18Н9Т на электроэрозионном станке модели 04ЭП-10М. В качестве ЭИ использовались омедненные вольфрамовые электроды  $\varnothing 0,2$  мм, в качестве рабочей жидкости использовалась водопроводная вода. Энергия электрических импульсов 301,3 мкДж, частота импульсов 44 кГц.

Выходными параметрами процесса прошивки микроотверстий являлись: производительность процесса  $Q$  – линейная скорость прошивки отверстий в мкм/с, и относительный линейный износ электрода-инструмента  $\gamma$  в %. Скорость прошивки измерялась с помощью секундомера и отсчётных устройств перемещения прошивочной головки станка. Относительный ли-

нейный износ электрода-инструмента определяется путем измерения глубины полученного отверстия и величины укорочения электрода после каждого опыта с помощью указанных отсчетных устройств.

На рис. 1 показана схема последовательности обработки отверстий и измерения линейного износа ЭИ.

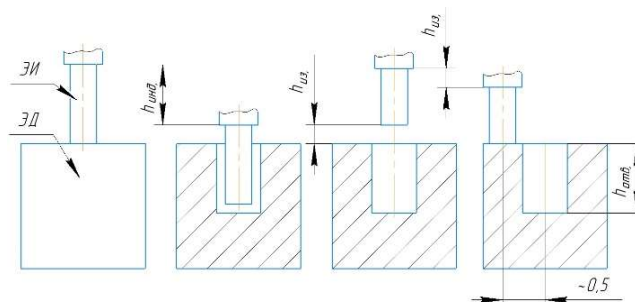


Рис. 1. Схема обработки и измерения износа электрода-инструмента: ЭД- электрод-деталь; ЭИ – электрод-инструмент;  $h_{инд.}$  – ход электрода-инструмента по индикатору;  $h_{изн.}$  – величина линейного износа электрода-инструмента;  $h_{отв.}$  – глубина полученного отверстия

**Основная часть.** Результаты измерений и обработки экспериментальных данных представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

**Значения измерений прошиваемых микроотверстий без торцовки ЭИ**

| № опыта | $h_{инд.}$ , мм | $h_{изн.}$ , мм | $h_{отв.}$ , мм | $\gamma$ , % | $t$ , с | $Q$ , мкм/с | $Kэ$ |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|---------|-------------|------|
| 1       | 0,5             | 0,12            | 0,38            | 31,5789      | 14,99   | 25,3502     | 0,8  |
| 2       | 0,5             | 0,09            | 0,41            | 21,9512      | 17,36   | 23,6175     | 1,08 |
| 3       | 0,5             | 0,1             | 0,4             | 25           | 15,44   | 25,9067     | 1,04 |
| 4       | 0,5             | 0,1             | 0,4             | 25           | 15,54   | 25,74       | 1,03 |
| 5       | 0,5             | 0,11            | 0,39            | 28,2051      | 16      | 24,375      | 0,86 |
| 6       | 0,5             | 0,1             | 0,4             | 25           | 15,57   | 25,6904     | 1,03 |
| 7       | 0,5             | 0,11            | 0,39            | 28,2051      | 16,59   | 23,5081     | 0,83 |
| 8       | 0,5             | 0,1             | 0,4             | 25           | 16,26   | 24,6002     | 0,98 |

Таблица 2

**Значения измерений прошиваемых микроотверстий с торцовкой ЭИ на 0,3 мм**

| № опыта | $h_{инд.}$ , мм | $h_{изн.}$ , мм | $h_{отв.}$ , мм | $\gamma$ , % | $t$ , с | $Q$ , мкм/с | $Kэ$ |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|---------|-------------|------|
| 1       | 0,5             | 0,06            | 0,44            | 13,6364      | 22,26   | 19,7664     | 1,45 |
| 2       | 0,5             | 0,07            | 0,43            | 16,2791      | 20,71   | 20,7629     | 1,28 |
| 3       | 0,5             | 0,08            | 0,42            | 19,0476      | 23,86   | 17,6027     | 0,92 |
| 4       | 0,5             | 0,07            | 0,43            | 16,2791      | 20,54   | 20,9348     | 1,29 |
| 5       | 0,5             | 0,08            | 0,42            | 19,0476      | 22,21   | 18,9104     | 0,99 |
| 6       | 0,5             | 0,06            | 0,44            | 13,6364      | 22,81   | 19,2898     | 1,41 |
| 7       | 0,5             | 0,07            | 0,43            | 16,2791      | 22,54   | 19,0772     | 1,17 |
| 8       | 0,5             | 0,06            | 0,44            | 13,6364      | 22,47   | 19,5817     | 1,44 |

$h_{отв.}$  – глубина отверстия:

$$h_{отв.} = h_{инд.} - h_{изн.}, \text{ мм} \quad (1)$$

где,  $h_{инд.}$  – ход электрода-инструмента (ЭИ), мм;  $h_{изн.}$  – величина линейного износа ЭИ контролируется по индикатору ИЧ-10, мм.

Производительность процесса (скорость прошивки отверстия):

$$Q = \frac{h_{отв.}}{t}, \text{ мкм/с} \quad (2)$$

где,  $t$  – время обработки (прошивки) отверстия, с.

Относительный линейный износ ЭИ:

$$\gamma = \frac{h_{изн.}}{h_{отв.}} \cdot 100\% \quad (3)$$

Коэффициент эффективности:

$$Kэ = \frac{Q}{\gamma} \quad (4)$$

Результаты расчета выходных параметров процесса  $\gamma$  и  $Q$  в восьми параллельных опытах для двух технологических вариантов ведения процесса представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3

**Значения относительного линейного износа ЭИ  $\gamma$**

| № опыта      |                 | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
|--------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\gamma, \%$ | без торцовки ЭИ | 31,58 | 21,95 | 25    | 25    | 28,21 | 25    | 28,21 | 25    |
|              | с торцовкой ЭИ  | 13,64 | 16,28 | 19,05 | 16,28 | 19,05 | 13,64 | 16,28 | 13,64 |

Таблица 4

**Значения линейной скорости прошивки отверстий Q**

| № опыта  |                 | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
|----------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Q, мкм/с | без торцовки ЭИ | 25,35 | 23,62 | 25,91 | 25,74 | 24,38 | 25,69 | 23,51 | 24,60 |
|          | с торцовкой ЭИ  | 19,77 | 20,76 | 17,60 | 20,93 | 18,91 | 19,29 | 19,08 | 19,58 |

Для точной оценки значимости отличий двух вариантов технологического процесса ЭЭП малых отверстий была выполнена детальная статистическая обработка данных двух выборок из  $n=8$  дублирующих (параллельных) опытов в каждой выборке.

Находим среднеарифметическое значение относительного линейного износа ЭИ  $\bar{\gamma}$ :

– для первой серии опытов без торцовки ЭИ

$$\bar{\gamma}_1 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{u=1}^n \gamma_{1u} = \frac{1}{8} \cdot 209,95 = 26,24 \quad (5)$$

где,  $u$  – номер параллельного опыта обрабатываемой серии;  $\bar{\gamma}_{1u}$  – износа ЭИ в  $u$ -том параллельном опыте первой серии опытов;  $n$  – количество опытов.

– для второй серии опытов с торцовкой ЭИ

$$\bar{\gamma}_2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{u=1}^n \gamma_{2u} = \frac{1}{8} \cdot 127,86 = 15,98 \quad (6)$$

Аналогично рассчитано среднеарифметическое значение производительности процесса ЭЭП микроотверстий  $\bar{Q}$ :

– без торцовки ЭИ

$$\bar{Q}_1 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{u=1}^n Q_{1u} = 24,85 \quad (7)$$

– с торцовкой ЭИ

$$\bar{Q}_2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{u=1}^n Q_{2u} = 19,49 \quad (8)$$

Для оценки однородности дисперсий по параметрам  $\gamma$  и  $Q$  двух вариантов технологического процесса находим, соответственно, четыре дисперсии опытов:

– для параметра  $\gamma$  без торцовки ЭИ

$$\sigma_{1\gamma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (\gamma_{1u} - \bar{\gamma}_1)^2 = \frac{1}{8-1} \cdot 60,76 = 8,68 \quad (9)$$

– для параметра  $\gamma$  с торцовкой ЭИ

$$\sigma_{2\gamma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (\gamma_{2u} - \bar{\gamma}_2)^2 = \frac{1}{8-1} \cdot 35,56 = 5,08 \quad (10)$$

– для параметра  $Q$  без торцовки ЭИ

$$\sigma_{1Q}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (Q_{1u} - \bar{Q}_1)^2 = \frac{1}{8-1} \cdot 6,44 = 0,92 \quad (11)$$

– для параметра  $Q$  с торцовкой ЭИ

$$\sigma_{2Q}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (Q_{2u} - \bar{Q}_2)^2 = \frac{1}{8-1} \cdot 7,91 = 1,13 \quad (12)$$

Для выявления грубых ошибок в эксперименте, определения достаточности параллельных опытов и оценки точности параметров эксперимента определяем ошибку опыта для четырех выборок как корень квадратный из дисперсии опыта:

– для параметра  $\gamma$  без торцовки ЭИ

$$\sigma_{1\gamma} = \sqrt{\sigma_{1\gamma}^2} = \sqrt{8,68} = 2,95 \quad (13)$$

– для параметра  $\gamma$  с торцовкой ЭИ

$$\sigma_{2\gamma} = \sqrt{\sigma_{2\gamma}^2} = \sqrt{5,08} = 2,25 \quad (14)$$

– для параметра  $Q$  без торцовки ЭИ

$$\sigma_{1Q} = \sqrt{\sigma_{1Q}^2} = \sqrt{0,92} = 0,96 \quad (15)$$

– для параметра  $Q$  с торцовкой ЭИ

$$\sigma_{2Q} = \sqrt{\sigma_{2Q}^2} = \sqrt{1,13} = 1,06 \quad (16)$$

**Выявление и исключение из результатов эксперимента сомнительных опытов (артефактов).** Сомнительные опыты отличаются резко выделяющимися результатами, т.е. грубыми погрешностями, вызванными значительным влиянием неуправляемых факторов, погрешностями измерений, грубыми ошибками экспериментатора. Результаты таких опытов из статистического ряда следует исключить, т.к. они ощутимо влияют на результаты эксперимента.

В нашем случае предельными значениями параметров  $\gamma$  и  $Q$ , полученных в  $n$ -параллельных опытах для двух вариантов технологического процесса, являются:

– для параметра  $\gamma$  без торцовки ЭИ

$$\gamma_{1max} = \bar{\gamma}_1 + \beta_{max} \cdot \sigma_{1\gamma} \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n}} = 26,24 + 2,17 \cdot 2,95 \cdot \sqrt{\frac{8-1}{8}} = 32,22 \quad (17)$$

$$\gamma_{1min} = \bar{\gamma}_1 - \beta_{max} \cdot \sigma_{1\gamma} \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n}} = 26,24 - 2,17 \cdot 2,95 \cdot \sqrt{\frac{8-1}{8}} = 20,26 \quad (18)$$

где,  $\beta_{max} = 2,17$  – табличный коэффициент [3], принимаемый для числа параллельных опытов  $n=8$  и доверительной вероятности 0,95.

– для параметра  $\gamma$  с торцовкой ЭИ

$$\gamma_{2max} = \bar{\gamma}_2 + \beta_{max} \cdot \sigma_{2\gamma} \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n}} = 15,98 + 2,17 \cdot 2,25 \cdot \sqrt{\frac{8-1}{8}} = 20,56 \quad (19)$$

$$\gamma_{2min} = \bar{\gamma}_2 - \beta_{max} \cdot \sigma_{2\gamma} \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n}} = 15,98 - 2,17 \cdot 2,25 \cdot \sqrt{\frac{8-1}{8}} = 11,4 \quad (20)$$

– для параметра  $Q$  без торцовки ЭИ

$$Q_{1max} = \bar{Q}_1 + \beta_{max} \cdot \sigma_{1Q} \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n}} = 24,85 + 2,17 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{\frac{8-1}{8}} = 26,8 \quad (21)$$

$$Q_{1min} = \bar{Q}_1 - \beta_{max} \cdot \sigma_{1Q} \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n}} = 24,85 - 2,17 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{\frac{8-1}{8}} = 22,9 \quad (22)$$

– для параметра  $Q$  с торцовкой ЭИ

$$Q_{2max} = \bar{Q}_2 + \beta_{max} \cdot \sigma_{2Q} \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n}} = 19,49 + 2,17 \cdot 1,06 \cdot \sqrt{\frac{8-1}{8}} = 21,65 \quad (23)$$

$$Q_{2min} = \bar{Q}_2 - \beta_{max} \cdot \sigma_{2Q} \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n}} = 19,49 - 2,17 \cdot 1,06 \cdot \sqrt{\frac{8-1}{8}} = 17,33 \quad (24)$$

Видно, что за пределами допустимых значений не вышло ни одно значение параметров  $\gamma$  и  $Q$  во всех четырех выборках, и их перерасчет не требуется.

Для обеспечения требуемой точности эксперимента определим минимально необходимое количество параллельных опытов по  $t_n$  – критерию [3]. Расчетное значение критерия:

– для параметра  $\gamma$  без торцовки ЭИ

$$t_{n1\gamma}^P = k_t \cdot \frac{\bar{\gamma}_1}{\sigma_{1\gamma}} = 0,2 \cdot \frac{26,24}{2,95} = 1,78 \quad (25)$$

где,  $k_T = 0,2$  (20 %) – допустимая точность в эксперименте, известная из практики исследований данного направления [3].

– для параметра  $\gamma$  с торцовкой ЭИ

$$t_{n2\gamma}^P = k_t \cdot \frac{\bar{\gamma}_2}{\sigma_{2\gamma}} = 0,2 \cdot \frac{15,98}{2,25} = 1,42 \quad (26)$$

– для параметра  $Q$  без торцовки ЭИ

$$t_{n1Q}^P = k_t \cdot \frac{\bar{Q}_1}{\sigma_{1Q}} = 0,2 \cdot \frac{24,85}{0,96} = 5,17 \quad (27)$$

– для параметра  $Q$  с торцовкой ЭИ

$$t_{n2Q}^P = k_t \cdot \frac{\bar{Q}_2}{\sigma_{2Q}} = 0,2 \cdot \frac{19,49}{1,06} = 3,67 \quad (28)$$

Расчетные значения критерия сравним с табличными [3]:

$$t_n^P = \frac{t}{\sqrt{f+1}} \quad (29)$$

где,  $t$  – критерий Стьюдента,  $f$  – соответствующее ему число степеней свободы.

Выбираем для каждой серии параллельных опытов ближайшее меньшее к расчетному табличному  $t_n^T$  значение критерия и соответствующее ему минимальное количество необходимых

опытов  $n_{min}$ . Из расчетов видно, что ближайшим меньшим к расчетному  $t_n^P$  критерию для параметра  $\gamma$ : без торцовки ЭИ является табличное значение  $t_n^T = 1,59$  которому соответствует  $n_{min} = 4$ , а с торцовкой ЭИ является табличное значение  $t_n^T = 1,24$ , которому соответствует  $n_{min} = 5$  [3]. Для параметра  $Q$ : без торцовки ЭИ и с торцовкой ЭИ является табличное значение  $t_n^T = 2,48$ , которому соответствует  $n_{min} = 3$  [3]. Следовательно, число параллельных опытов во всех сериях достаточно.

Для оценки реальной точности проведенного эксперимента определим доверительные интервалы измерений для каждой выборки по формуле [3]:

– для параметра  $\gamma$  без торцовки ЭИ

$$\Delta_{1\gamma} = \pm \frac{\sigma_{1\gamma} \cdot t}{\sqrt{n}} = \pm \frac{2,95 \cdot 2,37}{\sqrt{8}} = \pm 2,47 \quad (30)$$

– для параметра  $\gamma$  с торцовкой ЭИ

$$\Delta_{2\gamma} = \pm \frac{\sigma_{2\gamma} \cdot t}{\sqrt{n}} = \pm \frac{2,25 \cdot 2,37}{\sqrt{8}} = \pm 1,88 \quad (31)$$

– для параметра  $Q$  без торцовки ЭИ

$$\Delta_{1Q} = \pm \frac{\sigma_{1Q} \cdot t}{\sqrt{n}} = \pm \frac{0,96 \cdot 2,37}{\sqrt{8}} = \pm 0,81 \quad (32)$$

– для параметра  $Q$  с торцовкой ЭИ

$$\Delta_{2Q} = \pm \frac{\sigma_{2Q} \cdot t}{\sqrt{n}} = \pm \frac{1,06 \cdot 2,37}{\sqrt{8}} = \pm 0,89 \quad (33)$$

где,  $t = 2,37$  – табличное значение критерия Стьюдента при доверительной вероятности 95% (5% уровень значимости) и числе степеней свободы  $f=n-1=8-1=7$  [3].

Тогда относительная погрешность измерений для каждой выборки составит:

– для параметра  $\gamma$  без торцовки ЭИ

$$K_{1\gamma} = \pm \frac{\Delta_{1\gamma}}{\bar{\gamma}_1} \cdot 100 \% = \pm \frac{2,47}{26,24} \cdot 100 \% = \pm 9,41 \% \quad (34)$$

– для параметра  $\gamma$  с торцовкой ЭИ

$$K_{2\gamma} = \pm \frac{\Delta_{2\gamma}}{\bar{\gamma}_2} \cdot 100 \% = \pm \frac{1,88}{15,98} \cdot 100 \% = \pm 11,82 \% \quad (35)$$

– для параметра  $Q$  без торцовки ЭИ

$$K_{1Q} = \pm \frac{\Delta_{1Q}}{Q_1} \cdot 100 \% = \pm \frac{0,81}{24,85} \cdot 100 \% = \pm 3,24 \% \quad (36)$$

– для параметра  $Q$  с торцовкой ЭИ

$$K_{2Q} = \pm \frac{\Delta_{2Q}}{Q_2} \cdot 100 \% = \pm \frac{0,89}{19,49} \cdot 100 \% = \pm 4,57 \% \quad (37)$$

Для визуальной оценки результатов эксперимента на рисунке 2 и 3 показаны схемы рассеивания параметров  $\gamma$  и  $Q$  в двух вариантах технологического процесса и числе параллельных опытов  $n=8$ .

ивания параметров  $\gamma$  и  $Q$  в двух вариантах технологического процесса и числе параллельных опытов  $n=8$ .

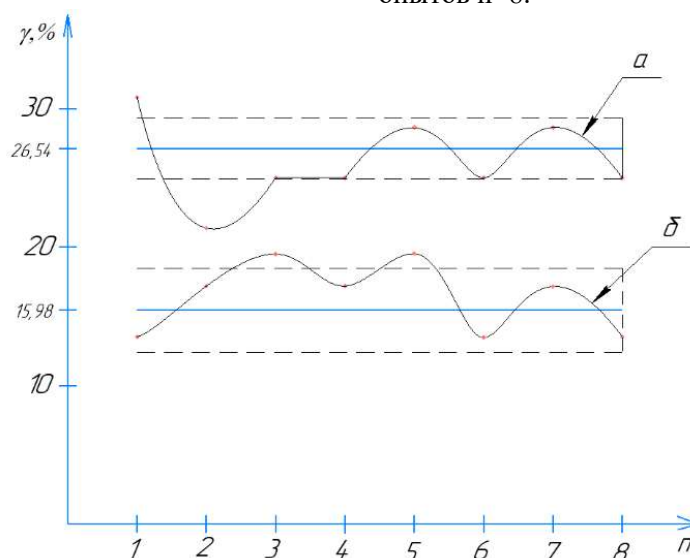


Рис. 2. Схема рассеивания параметра  $\gamma$  в восьми параллельных опытах: а – прошивка отверстий без торцовки ЭИ; б - прошивка отверстий с торцовки ЭИ

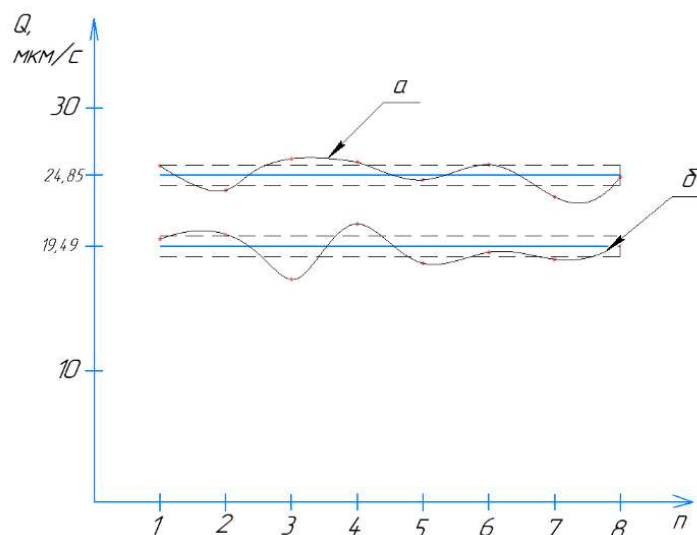


Рис. 3. Схема рассеивания параметра  $Q$  в восьми параллельных опытах: а – прошивка отверстий без торцовки ЭИ; б - прошивка отверстий с торцовки ЭИ.

Видно, что по износу  $\gamma$  ЭИ и производительности  $Q$  процесса варианты технологического процесса заметно отличаются. Оценим существенность различия этих параметров по критериям Стьюдента.

Так как число опытов  $n < 30$ , то расчётное значение критерия равно [3]:

– для параметра  $\gamma$

$$t_{p\gamma} = \frac{\bar{\gamma}_1 - \bar{\gamma}_2}{\sqrt{\frac{(n_1-1)\sigma_{1\gamma}^2 + (n_2-1)\sigma_{2\gamma}^2}{n_1+n_2-2} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} = \frac{26,24 - 15,98}{\sqrt{\frac{(8-1) \cdot 8,68 + (8-1) \cdot 5,08}{8+8-2} \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{1}{8}\right)}} = 7,82 \quad (38)$$

– для параметра  $Q$

$$t_{pQ} = \frac{\bar{Q}_1 - \bar{Q}_2}{\sqrt{\frac{(n_1-1)\sigma_{1Q}^2 + (n_2-1)\sigma_{2Q}^2}{n_1+n_2-2} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} = \frac{24,85 - 19,49}{\sqrt{\frac{(8-1) \cdot 0,92 + (8-1) \cdot 1,13}{8+8-2} \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{1}{8}\right)}} = 10,58 \quad (39)$$

где,  $n_1 = n_2 = 8$  – число параллельных опытов в обоих вариантах технологического процесса.

Расчетные значение критерия Стьюдента  $t_{p\gamma}$  и  $t_{pQ}$  сравниваем с табличным  $t_T$  которое определяем по заданной доверительной вероятности 95% и числу степеней свободы  $f = n_1 + n_2 - 2 = 8 + 8 - 2 = 14$ . Имеем  $t_T = 2,15$  [3].

Так как расчетные значение критерия  $t_{p\gamma}$  и  $t_{pQ}$  больше табличного  $t_{p\gamma} = 7,82 > t_T = 2,15$  и  $t_{pQ} = 10,58 > t_T = 2,15$ , то различие средних значений относительного износа  $\gamma$  и производительности процесса  $Q$  существенное.

#### Выводы:

1. По результатам статистической обработки данных эксперимента получены следующие значения относительного износа  $\gamma$  и производительности процесса  $Q$ :

– для параметра  $\gamma$  без торцовки ЭИ

$$\gamma_1 = \bar{\gamma}_1 \pm k_{\gamma_1} = 26,24 \pm 9,41\% \quad (40)$$

– для параметра  $\gamma$  с торцовкой ЭИ

$$\gamma_2 = \bar{\gamma}_2 \pm k_{\gamma_2} = 15,98 \pm 11,82\% \quad (41)$$

– для параметра  $Q$  без торцовки ЭИ

$$Q_1 = \bar{Q}_1 \pm k_{Q_1} = 24,85 \pm 3,24\% \quad (42)$$

– для параметра  $Q$  с торцовкой ЭИ

$$Q_2 = \bar{Q}_2 \pm k_{Q_2} = 19,49 \pm 4,57\% \quad (43)$$

Таким образом, применение операции торцовки ЭИ позволяет в 1,64 раза снизить износ ЭИ, тем самым существенно повысить точность обрабатываемых микроотверстий, но при этом снижается производительность процесса в 1,27 раза. Для комплексной оценки эффективности двух технологических процессов используем относительный показатель коэффициент эффективности [2]:

$$K_{\text{Э}} = \frac{\bar{Q}}{\bar{\gamma}} \quad (44)$$

Для двух вариантов технологического процесса он составит:

– без торцовки ЭИ

$$K_{\text{Э}1} = \frac{\bar{Q}_1}{\bar{\gamma}_1} = \frac{24,85}{26,24} = 0,95 \quad (45)$$

– с торцовкой ЭИ

$$K_{\text{Э}2} = \frac{\bar{Q}_2}{\bar{\gamma}_2} = \frac{19,49}{15,98} = 1,22 \quad (46)$$

Таким образом, эффективность процесса с торцовкой ЭИ в 1,3 раза выше по сравнению с вариантом без торцовки ЭИ.

2. Проведенные исследования убедительно показали целесообразность внедрения операции торцовки ЭИ в производство для снижения износа ЭИ и, следовательно, повышения качества изделий с глухими микроотверстиями, например, в массовое производство атрауматических хирургических игл, объем производства, которых составляет миллионы штук в год.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бойко А.Ф. Эффективная технология и оборудование для электроэрозионной прошивки прецизионных микроотверстий. Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. 314с.

2. Бойко А.Ф. Пузачева Е.И. Точность электроэрозионной прошивки микроотверстий // Технология машиностроения. 2012. №6. С. 50–53.

3. Бойко А.Ф., Воронкова М.Н. Теория планирования и организации многофакторных экспериментов. Белгород: Изд-во БГТУ. 2015. 102 с.

4. Бойко А.Ф., Погонин А.А., Домашенко Б.В. Исследование производительности электроэрозионной прошивки капиллярных отверстий // Междунар. науч.-техн. электронная интернет-конф. «Инструментальное и метрологическое обеспечение машиностроительных производств-2005»: Тез. докл. (Электронный ресурс). 2005. Вып. 1. С. 132–137.

5. Бойко А.Ф., Погонин А.А., Домашенко Б.В. Оптимизация энергии импульса при электроэрозионной прошивке капиллярных отверстий // Пятая Межрегион. с международным участием науч.-техн. конф. «Механики XXI века»: Сб. докл. г. Братск, БрГУ. 1-3 марта 2006. С. 256–261.

6. Бойко А.Ф., Погонин А.А., Домашенко Б.В. Влияние энергии и частоты импульсов тока на производительность электроэрозионной обработки капиллярных отверстий // Пятая Междунар. науч.-техн. интернет-конф. «Новые материалы и технологии в машиностроении»: Тез. докл. г. Брянск. БГИТА (Брянская государственная инженерно-технологическая академия). 2006. С. 113–117.

7. Спиридов А.Д. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение. 1981. 184 с.
8. Бойко А.Ф. Высокочастотная электроэрозионная прошивка отверстий малого диаметра. Электронная обработка материалов. 1980. №1. С.86–88.
9. Левинсон Е.М. Отверстия малых размеров (методы получения). Л.: Машиностроение, 1977. С. 61–103.
10. Холоднов Е.В. Электроискровое изготовление отверстий малого диаметра // Электрофизические и электрохимические методы обработки. М: НИИМАШ. 1970. №3. С. 18–22.
11. Фотеев Н.К. Электроэрозионная обработка отверстий. М.: Машиностроение, 1976. С. 4–5.
12. Артамонов Б.А., Вишницкий А.Л., Волков Ю.С. и др. Размерная электрическая обработка металлов. М.: Высшая школа, 1978. С. 146–148.
13. Ноздрин И.А., Бойко А.Ф., Бративник Ю.М. Технология получения сложных отверстий в твердосплавном инструменте для микросварки // Электронная техника. Сер. Технология, организация производства и оборудование. 1973. №6. С. 26–31.
14. Адлер Ю.П. Планирование промышленных экспериментов. М.: Металлургия. 1974. 264 с.
15. Герасименко В.Б. Технические основы создания машин: учебное пособие. Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова. 2004. 207 с.
16. Горский В.Г. Планирование промышленного эксперимента. М.: Металлургия. 1974. 264 с.
17. Грановский Г.И. Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов. М.: Машиностроение. 1982. 112 с.
18. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение. 1981. 184 с.
19. Юрьев А.Г. Организация научных исследований: учебное пособие. М.: МИСИ, БТИСМ. 1985. 88 с.
20. Юрьев А.Г. Основы научных исследований: учебное пособие. Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова. 2005. 87 с.
21. Ящерицын П.И. Планирование эксперимента в машиностроении. М: Высш. шк. 1985. 286 с.
22. Грачева К.А. Организация и планирование машиностроительного производства: учеб. М.: Высш. шк. 2003. 470 с.

*Информация об авторах*

**Бойко Анатолий Федорович**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения. E-mail: boyko\_1947@bk.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Подпратов Денис Викторович**, магистрант кафедры технологии машиностроения. E-mail: d.podpryatov@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

*Поступила 10.05.2020*

© Бойко А.Ф., Подпратов Д.В., 2020

*\*Boyko A.F., Podpryatov D.V*

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova*

*\*E-mail: boyko\_1947@bk.ru*

## COMPARATIVE ANALYSIS OF TWO METHODS OF ELECTROEROSION FIRMWARE FOR DEAF MICROHOLES

**Abstract.** *The paper presents the results of experimental studies of the significance of differences in the technological parameters of electroerosive micro-hole firmware for two variants of the micro-hole firmware series process: without facing the tool electrode and with the tool electrode facing after processing each hole. The significance of differences in the technological parameters of the firmware process is established: by the wear of the electrode-tool, by the productivity of the process and the efficiency of the process as a whole. Detailed statistical processing of data from two samples of eight duplicate (parallel) experiments in each sample is performed to accurately assess the significance of the differences between the two variants of the process of electroerosive firmware of microholes. Calculations are made of the limit values of parameters of the microholes' electroerosion firmware: the relative linear wear of the electrode-tool and the process performance. They allow identifying and excluding doubtful experiments (artifacts) from the results, i.e. experiments with sharply distinguished results. The results of such experiments should be excluded from the statistical*

series, since they significantly affect the results of the experiment. The paper uses an exact method for determining the required number of duplicate experiments developed at BSTU named after V. G. Shukhov. The conducted research clearly shows the feasibility of introducing the electrode-tool in manufacturing to reduce the wear of the electrode-tool and, therefore, increase the quality of products with deep microholes, for example, in the mass production of atraumatic surgical needles, the volume of production of which is millions of pieces per year.

**Keywords:** *electroerosive firmware, microhole, electrode-tool, linear wear, performance, efficiency coefficient.*

## REFERENCES

1. Boyko A.F. Efficient technology and equipment for electroerosive firmware for precision micro-holes [Effektivnaya tekhnologiya i oborudovaniye dlya elektroerozionnoy proshivki pretizionnykh mikrootverstiy]. Smartly. Belgorod. Publishing House of BSTU. 2010. 314 p. (rus)
2. Boyko A.F. The accuracy of electroerosive firmware of microholes [Tochnost' elektroerozionnoy proshivki mikrootverstiy]. Technology of mechanical engineering. 2012. No.6. Pp. 50–53. (rus)
3. Boyko A.F. The theory of planning and organizing multifactor experiments [Teoriya planirovaniya i organizatsii mnogofaktornykh eksperimentov]. Belgorod. Publishing House of BSTU. 2015. 102 p. (rus)
4. Boyko A. F., Pogonin A. A. Domashenko B. V. Study of the performance of the EDM firmware capillary holes [Issledovaniye proizvoditel'nosti elektroerozionnoy proshivki kapillyarnykh otverstiy]. International scientific and technical electronic Internet conference "Instrumental and metrological support of machine-building industries-2005". 2005. Vol. 1. Pp. 132–137. (rus)
5. Boyko A.F., Pogonin A.A. Domashenko B.V. Optimization of the pulse energy at the EDM firmware capillary holes [Optimizatsiya energii impul'sa pri elektroerozionnoy proshivke kapillyarnykh otverstiy]. Fifth interregional with international participation scientific conference "Mechanics of the XXI century": A collection of papers Bratsk, BrSU. 1-3 March 2006. Pp. 256–261. (rus)
6. Boyko A.F., Pogonin A.A. Domashenko B.V. The effect of the energy and frequency of the current pulses to the electrical discharge machining performance of capillary holes [Vliyaniye energii i chastoty impul'sov toka na moshchnost' elektroerozionnoy obrabotki kapillyarnykh otverstiy]. Fifth international scientific and technical Internet conference "New materials and technologies in mechanical engineering": Thesis report Bryansk. BGITA (Bryansk state Academy of engineering and technology). 2006. Pp. 113–117. (rus)
7. Spiridov A.D. Experiment Planning in the study of technological processes [Planirovaniye eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov]. M.: Mechanical Engineering. 1981. 184 p. (rus)
8. Boyko A.F. High-Frequency electroerosive piercing of small diameter holes [Vysokochastotnaya elektroerozionnaya proshivka otverstiy malogo rastoyaniyara]. Electronic processing of materials [Elektronnaya obrabotka materialov]. 1980. No. 1. Pp. 86–88. (rus)
9. Levinson E.M. Holes of small dimensions (getter) [Otverstiya malykh razmerov (metody polucheniya)]. L.: Mechanical Engineering. 1977. Pp. 61–103. (rus)
10. Kholodnov E.V. Electric-manufacturer of small holes [Elektroiskrovoye izgotovleniye otverstiy malogo rastoyaniyara]. Electrophysical and electrochemical methods of processing [Elektrofizicheskiye i elektrokhimicheskiye metody obrabotki]. M: NIIMASH. 1970. No. 3. Pp. 18–22.
11. Foteev N. To. Electric discharge machining of holes [Elektroerozionnaya obrabotka otverstiy]. M.: Mashinostroenie. 1976. Pp. 4–5. (rus)
12. Artamonov B.A., Vishnitsky A.L., Volkov Yu.S. Dimensional electrical treatment of metals [Razmernaya elektricheskaya obrabotka metallov]. M.: Higher school. 1978. Pp. 146–148. (rus)
13. Nozdrin I.A. Boyko A.F., Bratelnik Yu.M. The Technology of producing complex holes in carbide tool for microwelding [Tekhnologiya polucheniya slozhnykh otverstiy v tverdospлавном instrumente dlya mikrosvarki]. Elektronnaya Tekhnika. Ser. Technology, organization of production and equipment. 1973. No. 6. Pp. 26–31. (rus)
14. Adler Y.P. Planning of industrial experiments [Planirovaniye promyshlennogo eksperementa]. M.: Metallurgy. 1974. 264p. (rus)
15. Gerasimenko V.B. Technical basics of creating machines: tutorial [Tekhnicheskiye osnovy sozdaniya mashin: uchebnoye posobiye]. Belgorod. BSTU named after V. G. Shukhov. 2004. 207p. (rus)
16. Gorsky V.G. Planning an industrial experiment [Planirovaniye promyshlennogo eksperimenta]. M.: Metallurgy. 1974. 264 p. (rus)
17. Granovsky G. I. Processing the results of experimental studies of metal cutting. [Obrabotka rezultatov eksperemental'nykh issledovaniy rezaniya metallov]. M.: Engineering. 1982. 112 p. (rus)
18. Spiridonov A.A. Planning an experiment in the study of technological processes [Planirovaniye eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov]. M.: Engineering. 1981. 184 p. (rus)



19. Yuryev A.G. Organization of scientific research: tutorial. [Organizatsiya nauchnykh issledovaniy: uchebnoye posobiye]. M.: MISI. BTISM. 1985. 88 p. (rus)

20. Yuryev A.G. Fundamentals of scientific research: tutorial. [Osnovy nauchnykh issledovaniy: uchebnoye posobiye]. Belgorod. BSTU named after V. G. Shukhov. 2005. 87 p. (rus)

21. Yashcheritsyn P.I. experimental design in mechanical engineering [Planirovaniye eksperimenta v mashinostroyenii]. M: Higher school. 1985. 286p. (rus)

22. Gracheva K.A. Organization and planning of engineering production: textbook [Organizatsiya i planirovaniye mashinostroitel'nogo proizvodstva: ucheb]. M.: Higher. Shk. 2003. 470 p. (rus)

*Information about the authors*

**Boyko, Anatoly F.** DSc, Professor. E-mail: boyko\_1947@bk.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Podpryatov, Denis V.** Master student, E-mail: d.podpryatov@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 10.05.2020*

**Для цитирования:**

Бойко А.Ф., Подпрятков Д.В. Сравнительный анализ двух методов электроэрозионной прошивки глухих микроотверстий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 6. С. 137–144. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-6-136-144

**For citation:**

Boyko A.F., Podpryatov D.V. Comparative analysis of two methods of electroerosion firmware for deaf microholes. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 6. Pp. 137–144. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-6-136-144