

Электроэрозионная прошивка отверстий малого диаметра при наложении ультразвука. Часть 2. Технологии многоэлектродной обработки отверстий

А. А. Груздев, *Ю. А. Моргунов, Б. П. Саушкин, Н. В. Хомякова

Московский политехнический университет,
г. Москва, 107023, Россия, *e-mail: morgunov56@mail.ru

Поступила 19.07.2019
После доработки 07.08.2019
Принята к публикации 26.09.2019

На основании результатов выполненных ранее исследований и предложенных технологических рекомендаций обсуждается проектирование операции электроэрозионной прошивки (ЭЭП) отверстий малого диаметра при наложении ультразвука применительно к технологии изготовления фильтра с массивом из 580 отверстий ромбического сечения с диаметром вписанной окружности 0,25 мм. Рассмотрены параметры размерной и геометрической точности отверстий, полученных ЭЭП с помощью многоэлектродного инструмента при введении ультразвуковых колебаний в зону обработки. Предложены конструкции и технологии изготовления специальных электродов-инструментов для одновременной обработки всего массива отверстий и рассмотрены вопросы технического нормирования операции многоэлектродной обработки.

Ключевые слова: электроэрозионная прошивка, массив отверстий, многоэлектродная обработка, ультразвук, отверстия малого диаметра, нормирование операции

УДК 621.9.048

DOI: 10.5281/zenodo.3640634

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] рассмотрены результаты экспериментального исследования технологии электроэрозионной прошивки (ЭЭП) отверстий малого диаметра ($d < 0,5$ мм) при наложении ультразвукового (УЗ) поля, которые указывают на возможность снижения машинного времени обработки более чем на 50%. Было установлено, что ультразвуковые колебания, накладываемые с помощью магнитострикционного генератора и переходных элементов на оснастку с жестко закрепленной заготовкой, способствуют повышению стабильности процесса прошивки, что выражается в уменьшении поля рассеяния значений машинного времени обработки более чем в 5 раз.

АПРОБАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изготовление массива отверстий малого диаметра представляет собой сложную технологическую задачу, которая в ряде случаев решается с применением технологии многоэлектродной электроэрозионной обработки. Проектированию такой технологии в справочной и технической литературе уделяется недостаточное внимание, а необходимые справочно-нормативные материалы отсутствуют или малочисленны.

Для технологической апробации результатов, полученных в ходе экспериментальных исследо-

ваний, разработана операция электроэрозионной прошивки в дисковом фильтре массива из 580 отверстий ромбического сечения с острым углом при вершине 65° и диаметром вписанной окружности 0,25 мм. Расчетные диагонали такого ромба составляют 0,46 и 0,3 мм соответственно. Фактические номинальные размеры после измерения геометрии изготовленного инструмента составили: диагонали 0,43 и 0,28 мм соответственно, диаметр вписанной окружности 0,23 мм. Рабочая толщина фильтра – 0,8 мм, материал – коррозионностойкая сталь 12X18H10T. В соответствии с техническими требованиями заусенцы и притупление кромок отверстий не допускаются.

Для такого фильтра был изготовлен многоэлектродный инструмент, конфигурация рабочей части которого показана на рис. 1. Фотография торца рабочей части электрода-инструмента (ЭИ) представлена на рис. 2.

Рабочая часть ЭИ изготавливалась на электроэрозионном проволочно-вырезном станке с использованием электрода-проволоки диаметром 0,15 мм и последующей слесарной операцией, на которой периферийные электроды неполного профиля выявлялись под микроскопом, отгибались специальным пинцетом и удалялись. Рабочая длина электрода-инструмента составляет 4,5 мм, что позволяет использовать его для изготовления нескольких фильтров. Дальнейшее увеличение длины рабочей части электродов снижает жесткость

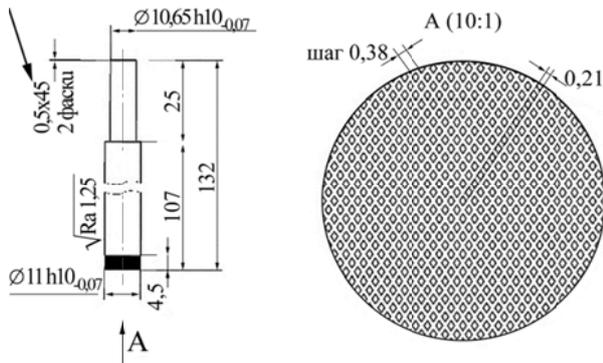


Рис. 1. Специальный концевой многоэлектродный ЭИ.

электродов-стержней, повышает вероятность их изгиба, что приводит к выходу из строя всего ЭИ.

Экспериментальные исследования по выбору материала ЭИ (вольфрам, медь и латунь) показали, что при использовании вольфрамового ЭИ наблюдалось хрупкое разрушение электродов, что приводило к браку детали при обработке. Поэтому в качестве материала для ЭИ выбрана латунь, обеспечивающая большую жесткость электродов-стержней.

При разработке данной электроэрозионной операции принимались во внимание следующие технологические рекомендации, основанные на результатах выполненных экспериментальных исследований [1–10]:

1. Обработку отверстий малого диаметра ($d < 0,6$ мм) рекомендуется проводить с наложением механических колебаний ультразвукового диапазона на деталь, что конструктивно упрощает и удешевляет оснастку.

2. Наложение УЗ колебаний позволяет интенсифицировать процесс эвакуации продуктов разряда из межэлектродного промежутка (МЭП), повысить производительность обработки в 1,5–2 раза, снизить шероховатость поверхности на 15–20%, обеспечить стабильность протекания процесса, увеличить в 1,5–2 раза глубину прошивки отверстия при прочих равных условиях.

3. Рекомендуемые параметры УЗ колебаний:

– частота колебаний $f_{\text{УЗ}} = 20\text{--}22$ кГц;

– амплитуда колебаний $A = (0,25\text{--}0,5) a_{\text{т}}$,

где $a_{\text{т}}$ – торцевой зазор.

4. Дистиллированная или техническая вода по ГОСТ 9.314-90, которую используют в качестве рабочей жидкости, не должна содержать твердые частицы размером более 2–5 мкм.

5. Для прошивки качественных отверстий диаметром 0,1–0,5 мм целесообразно использовать импульсы со следующими характеристиками: длительность импульса $\tau_{\text{и}}$ – не более 2–3 мкс; энергия разряда $W_{\text{и}}$ – менее 3 мДж.

6. При обработке в воде энергия разряда обычно регулируется длительностью разрядного

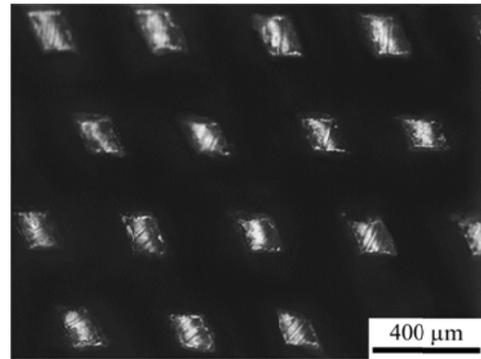


Рис. 2. Торцевая часть рабочей части инструмента.

импульса $\tau_{\text{и}} \leq [\tau_{\text{и}}]$. Чем она меньше, тем выше при прочих равных условиях доля паров металла, выброшенных в МЭП, по отношению к жидкой фазе, меньше средние размеры твердых продуктов эрозии.

7. Напряжение холостого хода определяется из выражения:

$$U_{\text{хх}} = (1,2\text{--}1,5)U_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{пр}}$ – напряжение пробоя, зависящее от величины торцевого зазора $a_{\text{т}}$ и степени загрязненности рабочей жидкости c , которое определяется по зависимости:

$$U_{\text{пр}} = f(a_{\text{т}}, c). \quad (2)$$

8. Длительность паузы $\tau_{\text{п}}$ непосредственно влияет на коэффициент эффективности использования импульсов $k_{\text{эф}}$, определяющий производительность прошивки.

Для определения $\tau_{\text{п}}$ используется выражение:

$$\tau_{\text{п}} > K_2[\tau_1], \quad (3)$$

где τ_1 – время жизни газового пузыря, генерируемого разрядным импульсом; K_2 – коэффициент, зависящий от площади обрабатываемой поверхности и энергии импульса.

9. Частоту следования импульсов f , которая дискретно изменяется по мере углубления электрода в заготовку, рекомендуется синхронизировать с УЗ колебаниями и выбирать по выражению:

$$f = \frac{f_{\text{УЗ}}}{n(h)}, \quad (4)$$

где $n(h)$ – целочисленная функция глубины отверстия, получаемая экспериментально для данных условий обработки и принимающая значения $1, 2, \dots, m$.

10. Для улучшения условий эвакуации продуктов разряда рекомендуется использовать схему синхронизации УЗ колебаний и импульсов напряжения, согласно которой импульсы напряжения приходятся на фазу максимального сближения ЭИ и детали [11].

Таблица 1. Технические данные генератора ГОРН-Т2

Наименование параметра	Значение
Напряжение между электродами U , В	20–200
Средний ток $I_{\text{ср}}$, А	1–15
Длительность импульса $\tau_{\text{и}}$, мкс	1–30
Частота следования импульсов f , кГц	1–100

Эксперименты производились на электроэрозионном прошивочном станке ЭПП-8 с генератором ГОРН-Т2, техническая характеристика которого представлена в табл. 1.

Станок оснащался устройством возбуждения УЗ колебаний с магнитострикционным преобразователем. Ультразвуковые колебания накладывали на приспособление с закрепленной в нем деталью в направлении, параллельном оси отверстия. При оценке влияния УЗ поля использовали колебания с частотой 22 кГц и амплитудой 5–10 мкм.

В процессе проектирования операции ЭЭП массива отверстий рассматривалась возможность двух вариантов обработки:

- вариант 1 – с последовательным изготовлением одиночных отверстий;
- вариант 2 – с одновременной прошивкой отверстий многоэлектродным инструментом.

Теоретически многоэлектродная обработка предпочтительна в связи с особенностями протекания процесса ЭЭП. После пробоя МЭП в рабочем зазоре формируется парогазовый пузырь, вытесняющий жидкость и эвакуирующий продукты эрозии. Пузырь будет некоторое время расширяться, а давление в нем падать, а затем произойдут его схлопывание и разрушение. Прохождение следующих рабочих разрядных импульсов невозможно до разрушения пузыря и релаксации МЭП. При многоэлектродной обработке площадь обработки пропорциональна числу отверстий (98,6 мм²) и существенно больше площади одного из них (0,17 мм²), поэтому частота следования разрядных импульсов в одном и том же отверстии заметно снизится и условия эвакуации продуктов эрозии из него улучшатся.

Параметры режима подбирались, исходя из устойчивого протекания процесса прошивки с учетом приведенных выше рекомендаций:

- для варианта 1 – $\tau_{\text{и}} = 2$ мкс, $W_{\text{и}} = 3,5$ мДж, $f = 5$ кГц, $U_{\text{хх}} = 120$ В;
- для варианта 2 – $\tau_{\text{и}} = 1$ мкс, $W_{\text{и}} = 1,2$ мДж, $f = 44$ кГц, $U_{\text{хх}} = 120$ В.

Снижение длительности импульса и, следовательно, размеров продуктов эрозии вызвано необходимостью эвакуации этих продуктов из центральной области прошиваемого массива к периферии сквозь межэлектродные щели. Для компенсации снижения мощности

импульсного разряда частота следования импульсов повышена до 44 кГц.

На рис. 3 представлена циклограмма перемещения инструмента при прошивке массива отверстий. Представленную кривую условно можно разделить на три участка.

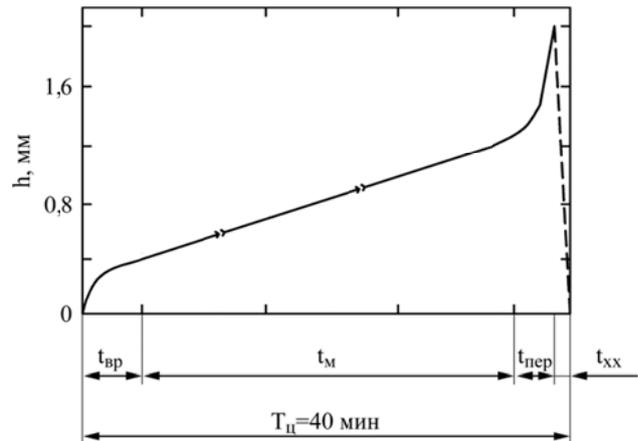


Рис. 3. Циклограмма перемещения многоэлектродного инструмента.

Первый участок – этап врезания (до $h = 0,4$ мм), на котором скорость подачи ЭИ снижается с предварительно заданной величины ($v_{\text{п нач.}} = 0,1$ мм/мин) до некоторого установившегося значения $v_{\text{п}}$.

Второй участок – процесс прошивки отверстий со скоростью заглубления ЭИ в деталь $v_{\text{п раб.}}$ ($0,4 \text{ мм} < h < 1,2 \text{ мм}$).

Третий участок – калибровка отверстия для устранения конусности в продольном сечении ($1,2 \text{ мм} < h < 1,6 \text{ мм}$).

На этом участке проблемы с выводом продуктов эрозии из межэлектродного промежутка (МЭП) отсутствуют, скорость прошивки увеличивается до $v_{\text{п нач.}}$, после чего происходят реверс и возврат инструмента в исходное положение.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Фотографии, позволяющие судить о качестве прошиваемых в фильтре отверстий, представлены на рис. 4.

Как видно, форма отверстия сохраняется как со стороны входа, так и выхода инструмента, кромки не имеют заусенца и не притуплены, стороны ромба прямолинейные.

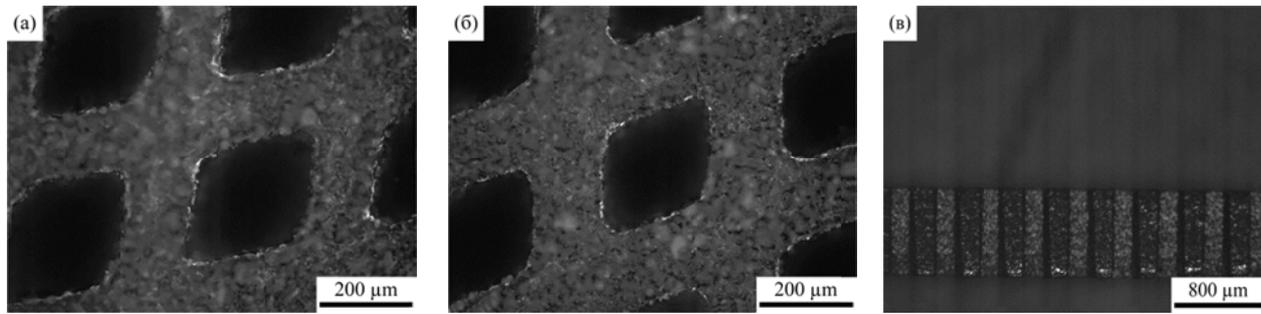


Рис. 4. Фотографии массива отверстий: (а) – со стороны входа инструмента; (б) – со стороны выхода инструмента; (в) – продольный разрез фильтра.

Таблица 2. Результаты измерения фактических размеров отверстия и инструмента

Измеряемое сечение	Геометрические параметры							
	D_1 , мм	D_2 , мм	d , мм	$S_{\text{отв}}$, мм ²	$V_{\text{отв}}$, мм ³	$\Pi_{\text{и}}$, мм	a_6 , мкм	$a_{\text{т}}$, мкм
На входе отверстия	0,50±0,02	0,35±0,01	0,29±0,01	0,16–0,18	0,12–0,14	1,22	30/45	20–30
На выходе отверстия	0,47±0,01	0,33±0,01	0,28±0,01	0,15–0,16		1,15	25/30	16–20
На торце ЭИ	0,43±0,02	0,28±0,02	0,23±0,02	0,11–0,13	–	–	–	–

D_1 и D_2 – соответственно большая и малая диагонали ромба; d – диаметр вписанной в ромб окружности; $S_{\text{отв}}$ – площадь сечения отверстия; $V_{\text{отв}}$ – объем отверстия; $\Pi_{\text{и}}$ – периметр инструмента; a_6 – боковой зазор; $a_{\text{т}}$ – торцевой зазор.

Результаты обмера геометрических параметров сечений 10 отверстий на входе инструмента в деталь и выходе из нее показаны в табл. 2. Там же приведены результаты обмера 10 электродов-стержней многоэлектродного инструмента в торцевом сечении перед обработкой. По данным обмера диагоналей ромба рассчитаны площадь сечения S и объем V одного отверстия. Погрешность, связанная с закруглением углов ромба, не превышает при этом 4% номинальных величин.

Боковой зазор a_6 рассчитывали двумя способами: как разность измеренных радиусов окружностей, вписанных в сечение отверстия $r_{\text{отв}}$ и инструмента $r_{\text{и}}$ (числитель в соответствующем столбце табл. 2), и по выражению, вытекающему из равенства разности площадей отверстия $S_{\text{отв}}$ и инструмента $S_{\text{и}}$ в данном сечении, то есть площади сечения бокового зазора, произведению периметра инструмента $\Pi_{\text{и}}$ и величины среднего бокового зазора (знаменатель в графе 8 табл. 2):

$$a_6 = (S_{\text{отв}} - S_{\text{и}}) / \Pi_{\text{и}}. \quad (5)$$

Как следует из данных табл. 2, определение зазора по второму способу дает большие значения бокового зазора по отношению к первому, однако с более высокой погрешностью. Торцевой зазор $a_{\text{т}}$ рассчитывали, принимая отношение $a_6/a_{\text{т}} = 1,5$. Фактическое значение зазора, измеренное на станке (20 мкм), незначительно отличается от рассчитанного значения.

Для оценки погрешности формы в продольном сечении использовали фотографии

продольного разреза отверстия. Измерения показали, что отклонение размера по длине отверстия не превышает 5 мкм, что согласуется с оценкой, выполненной по значениям диаметра вписанной окружности на входе и выходе из отверстия, приведенным в табл. 2.

На рис. 5 показаны фотографии перфорированных образцов, полученных при указанных выше параметрах режима обработки.



Рис. 5. Общий вид изготовленных деталей.

Нормирование ЭЭП массива отверстий осуществлялось по следующей методике.

При прошивке отверстий измерялось машинное время обработки и по известным значениям длины и объема отверстий находились средние линейная и объемная скорости эрозии $v_{\text{экс}}$ и $v_{\text{экс}}^{\text{об}}$ соответственно:

$$v_{\text{экс}} = h / t_{\text{м}}; \quad v_{\text{экс}}^{\text{об}} = V / t_{\text{м}}, \quad (6)$$

где h – глубина отверстия; V – объем массива отверстий; $t_{\text{м}}$ – машинное время обработки при постоянной установившейся подаче ЭИ (без учета врезания и перебега).

Таблица 3. Составляющие штучно-калькуляционного времени, экспериментальные и расчетные значения параметров кинематики и фактический коэффициент эффективности

	t_m , МИН	t_m^* , МИН	t_b , МИН	$t_{оп}$, МИН	$V_{экс}$, ММ/МИН	$V_{экс}^{об}$, ММ ³ /МИН	V_p , ММ/МИН	$V_p^{об}$, ММ ³ /МИН	$k_{эф}$
Вариант 1	244	418	473	891	1,9	0,33	27,6	4,7	0,07
Вариант 2	30,0	40,3	6,7	47,0	0,026	2,13	0,144	14,2	0,15

В табл. 3 приведены элементы штучно-калькуляционного времени, а также экспериментальные и расчетные значения скорости эрозии и коэффициент эффективности.

Машинное время t_m^* определялось с учетом врезания и перебега (0,8 мм), необходимого для калибровки отверстия. Так, при прошивке одного отверстия (вариант 1) $t_m = 0,42$ мин и $t_m^* = 0,72$ мин соответственно. Время t_m^* использовали для нормирования операции, а время t_m – для расчетов, связанных с определением фактического коэффициента эффективности.

Вспомогательное время для варианта 1 и данных условий обработки определялось по следующему выражению:

$$t_b = N(t_{рз} + t_{подр}) + n_1 t_{запр} + n_2 t_{пер} + t_{yb}, \quad (7)$$

где N – число отверстий в массиве ($N = 580$ шт.); $t_{рз}$ – время определения положения детали (касание ЭИ поверхности детали) и отвода ЭИ на рабочий зазор ($t_{рз} = 0,02$ мин); $t_{подр}$ – время подрезки, включающее в себя время вывода ЭИ из прошитого отверстия, его перемещение в позицию подрезки, время определения положения правящего инструмента, подвода ЭИ на рабочий зазор, время подрезки, время перемещения ЭИ в исходное положение ($t_{подр} = 0,75$ мин); $t_{запр}$ – время, необходимое для заправки нового ЭИ после износа предыдущего ($t_{запр} = 4,7$ мин); $t_{пер}$ – время перехвата ЭИ электромагнитами после выработки рабочей длины ($t_{пер} = 0,08$ мин); t_{yb} – время на установку и закрепление детали и включение станка ($t_{yb} = 6$ мин); n_1 – число заливок нового инструмента при обработке массива единичным инструментом за время всего цикла обработки ($n_1 = 4$); n_2 – число перехватов после выработки рабочей длины ЭИ ($n_2 = 33$); $h_{раб}$ – рабочая длина, расстояние между торцом кондуктора для ЭИ и механизмом захвата и подачи ЭИ ($h_{раб} = 30$ мм).

В первом варианте ЭИ «подрезается» на величину, равную сумме глубины отверстия и величины калибровки (1,6 мм). Вспомогательная операция подрезки необходима для устранения конусности ЭИ, возникшей в процессе прошивки отверстия и формирования выходного сечения отверстия. Расход ЭИ с учетом подрезки после прошивки каждого отверстия составлял 1,6 мм.

Стандартного ЭИ рабочей длиной 300 мм (общая длина стандартного ЭИ составляет 400 мм, 100 мм – расстояние между деталью и механизмом захвата и подачи ЭИ) хватает на обработку 187 отверстий.

При одновременной обработке массива отверстий (вариант 2) вспомогательное время t_b определялось по формуле:

$$t_b = t_{yb} + t_{рз}, \quad (8)$$

где t_{yb} – время на установку и закрепление детали и включение станка; $t_{рз}$ – время определения положения детали (касание ЭИ поверхности детали) и отвода ЭИ на рабочий зазор.

Таким образом, из данных табл. 3 следует, что штучно-калькуляционное время при обработке массива отверстий более чем в 16 раз ниже, чем при их последовательной обработке единичным электродом. При этом машинное время (t_m^*) снижается более чем в 10 раз, вспомогательное – в 70,6 раза.

Оперативное время $t_{оп}$ для изготовления всего массива отверстий определяется по выражению:

$$t_{оп} = t_m^* + t_b. \quad (9)$$

Для оценки коэффициента эффективности производился расчет объемной скорости эрозии для условий аддитивного процесса по выражению:

$$V_p^{об} = 60k_{эр} W_n f, \quad (10)$$

где $k_{эр}$ – коэффициент эрозии, значение которого принято по данным работы [12].

Фактическое значение коэффициента эффективности получено по выражению:

$$k_{эф} = V_{экс}^{об} / V_p^{об}. \quad (11)$$

Полученные значения коэффициента эффективности представлены в табл. 3. Как видно, при многоэлектродной обработке величина $k_{эф}$ вдвое больше, чем при обработке единичным электродом, что связано со значительным увеличением площади обработки. Вместе с тем значения $k_{эф}$, полученные при обработке единичным электродом, заметно ниже, чем принятые в работе [1] путем прямого подсчета относительной доли импульсов холостого хода и короткого замыкания. Это, очевидно, связано с

тем, что в [1] из-за методических трудностей не учитывались импульсы разряда через газопаровые включения и твердые продукты эрозии, присутствующие в рабочей жидкости, которые, по-видимому, играют существенную роль при обработке малых отверстий в условиях стесненного отвода продуктов эрозии из рабочей зоны.

В связи со сказанным следует отметить еще одно обстоятельство. При указанных выше энергетических параметрах разрядного импульса, среднем диаметре лунки 100 мкм [2] и доле энергии, выделившейся на электроде и равной 0,4 [13], оценка среднего значения плотности потока мощности в пятне контакта плазменного столба с поверхностью электрода дает значение $(0,5-1,5) \cdot 10^7$ Вт/см². Это означает, что практически весь объем лунки формируется по механизму испарения, то есть значение коэффициента эрозии, принятого в расчете по формуле (4), несколько завышено (не более чем в 1,5 раза).

Недостатком рассмотренной технологии считается низкая стойкость многоэлектродного ЭИ (2–3 фильтра) и относительно высокая доля затрат на инструмент в калькуляции себестоимости. Для увеличения ресурса работы многоэлектродного инструмента целесообразно использовать специальные сборные конструкции ЭИ [14]. Сборка такого многоэлектродного инструмента для прошивки массива из 580 отверстий в фильтре составляет около 330 мин. Учитывая, что полезная длина электрода равна 300 мм, а величина его линейного износа принята равной 1,6 мм, получаем, что таким инструментом можно обработать 185 фильтров. Это существенно снизит затраты на инструмент. Расчеты показали, что штучно-калькуляционное время составило 928 мин и 56 мин по вариантам 1 и 2 соответственно.

Эффективность многоэлектродных наладок определяется годовым объемом выпуска изделий. Для каждого конкретного изделия можно рассчитать критическую величину годового объема, выше которой применение многоинструментальных наладок экономически эффективно. При меньших объемах выпуска применяют другие технологии [13].

ВЫВОДЫ

Разработана и проанализирована технология электроэрозионной прошивки массива отверстий малого диаметра с помощью многоэлектродного электрода-инструмента с наложением ультразвука на изделие, даны технологические рекомендации по проектированию операций ЭЭП, обоснованы и апробированы параметры режима

прошивки, обеспечивающие стабильное протекание процесса и получение изделий, соответствующих техническим требованиям.

Выполнено нормирование операции изготовления фильтров многоэлектродным инструментом. Даны рекомендации в области применения многоэлектродного ЭИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Груздев А.А., Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П. *ЭОМ*. 2019, **55**(1), 12–16.
2. Груздев А.А., Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П. *Научные технологии в машиностроении*. 2017, **75**(9), 17–20.
3. Morgunov Yu.A., Saushkin B.P., Saushkin G.B. *Russ Eng Res*. 2019, **39**(2), 125–128.
4. Hao Ni., Gong Hu., Dong Y.H., Fang F.Z. et al. *Int J Adv Manuf Technol*. 2018, **95**, 1465–1472.
5. Sanjay Kumar, Sandeep Grover, Walia R.S. *Int J Precis Technol*. 2017, (7), 51–84.
6. Nowicki R., Świercz R., Oniszczyk-Świercz D., Dąbrowski L. et al. *AIP Conference Proceedings*. 2017, 020019 (2018); doi: 10.1063/1.5056282.
7. Liao Y.S., Liang H.W. *Procedia CIRP*. 2016, **42**, 552–556.
8. Deng Z.Q., Zhu Y.W., Wang F., Gu X. et al. *Strength Mater*. 2017, **49**, 37–44.
9. Lin Y.C., Hung J.C., Lee H.M., Wang A.C. et al. *Int J Adv Manuf Technol*. 2017, **92**, 2801–2808.
10. Qingqing Zhao, Zhenquan Deng, Dashi Yang, Xiang Gu et al. *Procedia CIRP*. 2018, **68**, 150–155.
11. Груздев А.А., Митрюшин Е.А., Саушкин Б.П. и др. *Способ электроэрозионной прошивки отверстий*. Патент RU на изобретение № 2522864. Опубликовано 20.07.2014 г., Бюл. № 20.
12. Саушкин Б.П. *РИТМ машиностроения*. 2012, **9**, 20–24.
13. Елисеев Ю.С., Саушкин Б.П. *Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники*. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Баумана. 2010. 437 с.
14. Gruzdev A.A., Morgunov Yu.A., Saushkin B.P. *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2018/ Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2018, 1467–1473. doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5.

Summary

Based on the results of previous studies and proposed technological recommendations, the design of the operation of electroerosive firmware (EEF) of small diameter holes is discussed. To this end, ultrasound is applied in relation to the technology of manufacturing a filter with an array of 580 rhombic cross-section holes with an inscribed circle diameter of 0.25 mm. The parameters of dimensional and geometrical accuracy of the holes obtained by EEF using a multi-electrode tool with the introduction of ultrasonic vibrations into the treatment area are considered.

Keywords: small diameter holes, electrodischarge drilling, ultrasonic, array of holes, multielectrode processing, operation rationing