

УДК 621.9.048

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ПРОШИВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ

<sup>1</sup>Биленко С.В., <sup>1</sup>Сарилов М.Ю., <sup>1</sup>Бурдасов Е.Н., <sup>2</sup>Маслацова А.Э.

<sup>1</sup>Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет,  
Комсомольск-на-Амуре, e-mail: kngg@knastu.ru;

<sup>2</sup>ОАО «Комсомольское-на-Амуре государственное производственное объединение  
им. Ю.А. Гагарина», Комсомольск-на-Амуре, e-mail: kukush86@mail.ru

Постоянное усложнение формы деталей, и, как следствие, повышенные требования к их точности и надёжности, в машиностроении – неотъемлемая составляющая технического прогресса. Для повышения надёжности требуется применение более прочных материалов, обработка которых классическими методами затруднена. Особенностью ЭЭО является то, что обработка ведется импульсами тока, в результате чего происходит удаление материала заготовки. Данный метод обработки позволяет получать изделия практически любой конфигурации с требуемыми параметрами качества поверхностного слоя со значительно меньшими затратами, чем при механической обработке. Для реализации предложенного в статье алгоритма имитационного компьютерного моделирования процесса ЭЭО был разработан комплекс математических моделей сопряженных физических процессов при единичном электрическом разряде, включающий в себя модель распределения электрических потенциалов в зоне обработки, модель пробоя межэлектродного промежутка (МЭП), модель движения продуктов эрозии в межэлектродном зазоре. Для построения сеточной модели рабочей области задается диаметр электрода-инструмента, глубина прошиваемого отверстия, тип рабочей жидкости и напряжение, подаваемое на электроды. Следует отметить, что наибольшая напряженность электрического поля наблюдается на углах ЭИ. Для имитации движения продуктов эрозии в РЖ в данной компьютерной модели используется клеточно-автоматная модель FHP-EP (**erosion products**). Если при расчете пробоя выяснится, что пробой невозможен, вследствие слишком большого расстояния между электродами, то модель произведет опускание ЭИ вниз на высоту одной ячейки сеточной модели. При этом частицам продуктов эрозии, расположенным непосредственно под ЭИ, будет придан дополнительный импульс, направленный вниз, и модель выполнит соответствующую операцию расчета движения продуктов эрозии. При имитационном моделировании процесса образования продуктов эрозии в результате каждого единичного разряда, установлено, что суммарное действие износа электрода-инструмента и продуктов эрозии изменяет величину межэлектродного зазора, и, как следствие, форму и размеры обрабатываемого отверстия.

**Ключевые слова:** электроэрозионная обработка, компьютерное моделирование, сеточная модель, электрический пробой, клеточные автоматы

## ISSLEDOVANIE PROCESSA JELEKTROJEROZIONNOGO PROSHIVANIJA OTVERSTIJ

<sup>1</sup>Bilenko S.V., <sup>1</sup>Sarilov M.Y., <sup>1</sup>Burdasov E.N., <sup>2</sup>Maslacova A.E.

<sup>1</sup>Komsomolsk-on-Amur state technical university, Komsomolsk-on-Amur, e-mail: kngg@knastu.ru;

<sup>2</sup>OAO Komsomolsk-on-Amur state industrial corporatio n.a. U.A. Gagarin, Komsomolsk-on-Amur,  
e-mail: kukush86@mail.ru

Forms a permanent complication of parts, and as a consequence, increased demands on their accuracy and reliability in the engineering industry – an integral component of technical progress. To improve reliability requires the use of stronger materials, processing of which the classical methods is difficult. EEE feature is that the processing is performed by current pulses, resulting in the removal of the workpiece material. This processing method allows to obtain products of almost any configuration with required parameters of quality of the surface layer with a significantly lower cost than machining. To implement the proposed algorithm in the paper computer simulation process, EEE was developed complex mathematical models of coupled physical processes in the electric discharge unit, which includes the model of the distribution of electrical potential in the treatment zone, the model of the breakdown of the interelectrode gap (IEP), a model of the products of erosion in the interelectrode gap. To construct the network model is given by the diameter of the working electrode-tool, the depth of the hole stitches, the type of working fluid and the voltage applied to the electrodes. It should be noted that the maximum electric field intensity is observed at the corners of EI. To simulate the movement of products in the erosion of gastric cancer in the computer model used by cellular automata model FHP-EP (erosion products). If the calculation of the breakdown reveals that the breakdown is impossible due to too much distance between the electrodes, then the model will produce a lowering of EI down to a height of one cell of the grid model. The particle erosion products, located directly under the EI will give additional momentum, downward, and the model will perform the appropriate operation on the calculation of the products of erosion. For simulation of the formation of erosion products from every single category, it was found that the cumulative effect of tool-electrode wear and the products of erosion changes the magnitude of the interelectrode gap, and as a consequence of the shape and dimensions of machined holes

**Keywords:** spark machining, computer simulation, grid model, electric breakdown, cellular automata

Постоянное усложнение формы деталей, и, как следствие, повышенные требования к их точности и надёжности, в машиностроении – неотъемлемая составляющая технического прогресса. Для повышения

надёжности требуется применение более прочных материалов, обработка которых классическими методами затруднена. К таким материалам относятся различные высокопрочные материалы, нержавеющей

и жаропрочные стали, твердые и титановые сплавы, широко применяемые в авиа-, судо-, автомобиле-, двигателе- и приборостроении, инструментальном производстве [1, 2]. А для повышения точности необходимо учитывать все значимые процессы, происходящие при обработке, что, в свою очередь, позволит снизить погрешность производства деталей. Вышеназванные требования можно выполнить благодаря использованию методов обработки, основанных на электрофизикохимических воздействиях. Одним из таких методов является электроэрозионная обработка (ЭЭО).

Особенностью ЭЭО является то, что обработка ведется импульсами тока, в результате чего происходит удаление материала заготовки. Данный метод обработки позволяет получать изделия практически любой конфигурации с требуемыми параметрами качества поверхностного слоя со значительно меньшими затратами, чем при механической обработке.

Одним из наиболее распространенных методов ЭЭО является метод электроэрозионной прошивки, обеспечивающий возможность изготовления глубоких отверстий различной конфигурации. При прошивании глубоких отверстий основной задачей является поддержание процесса и его интенсификация при значительном внедрении электрода-инструмента в заготовку, когда условия эвакуации продуктов обработки из межэлектродного промежутка затруднены [3]. При прошивании отверстия частицы продуктов эрозии, двигаясь между уже обработанной поверхностью детали и образующей поверхностью электрода-инструмента, вызывают дополнительные электрические разряды, что ведет к возникновению конусности. Для решения данной проблемы используют станки с автоматическим выводом электрода-инструмента (релаксацией) из отверстия для очистки его от продуктов эрозии, а также прокачку или отсос рабочей жидкости.

Следует отметить, что ЭЭО является сложным физическим процессом, экспериментальное исследование которого в значительной степени затруднено вследствие сложности внедрения измерительных приборов непосредственно в зону обработки. Однако процесс ЭЭО можно представить в виде совокупности отдельных процессов, протекание которых подчиняется известным физическим законам, каждый из которых можно описать с помощью математических моделей. Поэтому одним из перспективных методов исследования ЭЭО является имитационное компьютерное моделирование, основанное на математиче-

ских моделях физических процессов, происходящих в зоне обработки.

### **Имитационное компьютерное моделирование процесса электроэрозионной обработки**

Этапы имитационного компьютерного моделирования процесса ЭЭО:

1. Назначаются размеры рабочей области и ячейки сетки, задаются технологические параметры процесса ЭЭО, затем на основании этих данных строится сеточная модель рабочей области.

2. Используя сеточную модель, производится расчет напряженности электрического поля в ячейках сетки в зависимости от текущего положения электродов и концентрации продуктов эрозии в рабочей жидкости.

3. Рассчитывается электрическая прочность локальных участков рабочей жидкости, в зависимости от концентрации содержащихся в них продуктов обработки, и производится проверка возможности возникновения электрического пробоя между электродом-инструментом (ЭИ) и электродом-заготовкой (ЭЗ).

4. Если для данного положения электродов и концентрации продуктов эрозии пробой межэлектродного промежутка возможен, то рассчитывается траектория образования электрической дуги.

5. В местах соприкосновения дуги с электродами формируются эрозионные лунки, и рассчитываются направления разлета продуктов эрозии, образовавшихся в лунках.

6. С учетом вновь образовавшихся продуктов обработки производится глобальный расчет движения всех продуктов эрозии в рабочей жидкости. При этом в случае использования принудительной прокачки рабочей жидкости, всем частицам продуктов эрозии придается импульс, направление которого совпадает с направлением прокачки.

7. Затем снова производится расчет напряженности электрического поля в ячейках сетки в зависимости от текущей концентрации продуктов эрозии, и процесс моделирования итерационно повторяется.

8. Если в процессе ЭЭО межэлектродный зазор увеличился настолько, что образование электрической дуги становится невозможно, то происходит опускание электрода-инструмента вниз на высоту одной ячейки сеточной модели.

9. Если на этом этапе достигнута заданная глубина прошиваемого отверстия или же достигнуто «дно» сеточной модели, то процесс моделирования прекращается.

10. Если заданная глубина прошиваемого отверстия не достигнута, то работа ком-

пьютерной модели продолжается. Следует отметить, что процесс опускания электрода-инструмента сопряжен с дополнительным приложением импульса к частичкам продуктов обработки, взвешенным в рабочей жидкости, поэтому после этого этапа необходимо снова произвести глобальный расчет движения продуктов эрозии в рабочей жидкости.

Для реализации предложенного алгоритма имитационного компьютерного моделирования процесса ЭЭО был разработан

комплекс математических моделей сопряженных физических процессов при единичном электрическом разряде, включающий в себя модель распределения электрических потенциалов в зоне обработки, модель пробоя межэлектродного промежутка (МЭП), модель движения продуктов эрозии в межэлектродном зазоре.

Моделирование процесса ЭЭО производится в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 1.

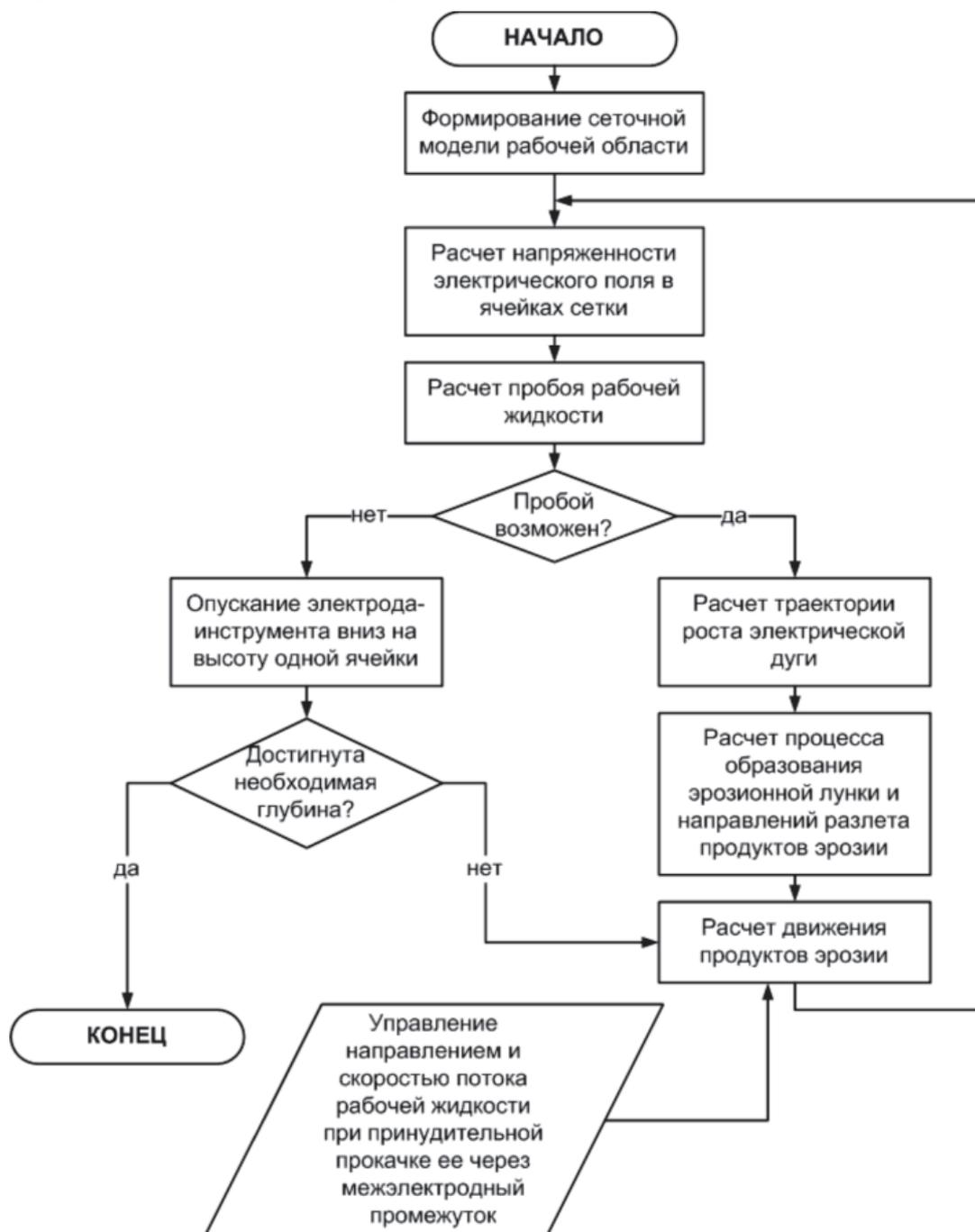


Рис. 1. Алгоритм компьютерного моделирования процесса электроэрозионной обработки

### Сеточная модель распределения электрических потенциалов в рабочей области

Для построения сеточной модели рабочей области задается диаметр электрода-инструмента  $D_{и}$ , глубина прошиваемого отверстия  $H_0$  (рис. 2), тип рабочей жидкости (РЖ) и напряжение, подаваемое на электроды. Исходя из электрических свойств используемой РЖ и напряжения импульсов, рассчитывается номинальный (для чистой РЖ) размер МЭП  $h_{мэп}$ :

$$h_{мэп} = \frac{U_{и}}{E_{пр}}, \quad (1)$$

где  $U_{и}$  – напряжение импульса, В;  $E_{пр}$  – электрическая прочность незагрязненной РЖ, В/м.

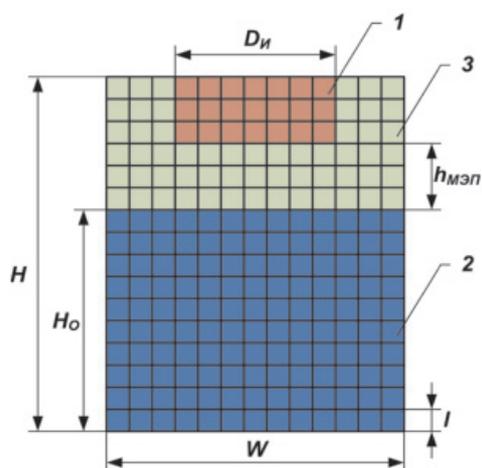


Рис. 2. Сеточная модель рабочей области:  
1 – электрод-инструмент;  
2 – электрод-заготовка; 3 – рабочая жидкость

Исходя из рассчитанного  $h_{мэп}$ , выбирается размер ячейки сетки  $l$  таким образом, чтобы МЭП укладывался в целое число ячеек сетки и составлял не менее трех ячеек. При использовании в качестве РЖ керосина и напряжении импульсов, равном 200 В, размер ячейки сетки выбирается в интервале от 1 до 10 мкм и размер МЭП составляет от 3 до 28 ячеек.

На основании геометрических размеров электродов  $D_{и}$ ,  $H_0$  и величины МЭП задаются ширина  $W$  и высота  $H$  сеточной модели, выраженные в количестве ячеек.

Расчет электростатического поля в зоне обработки производится методом конечных разностей. При этом непосредственно для расчета электрических потенциалов ячеек используется метод резистивных сеток, где в качестве сопротивлений выступают величины, обратные диэлектрическим проницаемостям ячеек сетки. Для ячеек, соответствующих электродам, диэлектрическая проницаемость принимается равной большому конечному числу.

Пример распределения электрических потенциалов в зоне обработки до начала расчета и после завершения вычисления электростатического поля приведен на рис. 3.

### Модель пробоя межэлектродного промежутка

После расчета электростатического поля происходит расчет пробоя локальных участков РЖ. Для этого вычисляется электрическая прочность ячеек МЭП. В данной модели каждая ячейка РЖ может быть загрязнена продуктами эрозии, причем концентрация загрязнения может составлять от 0 до 100%.

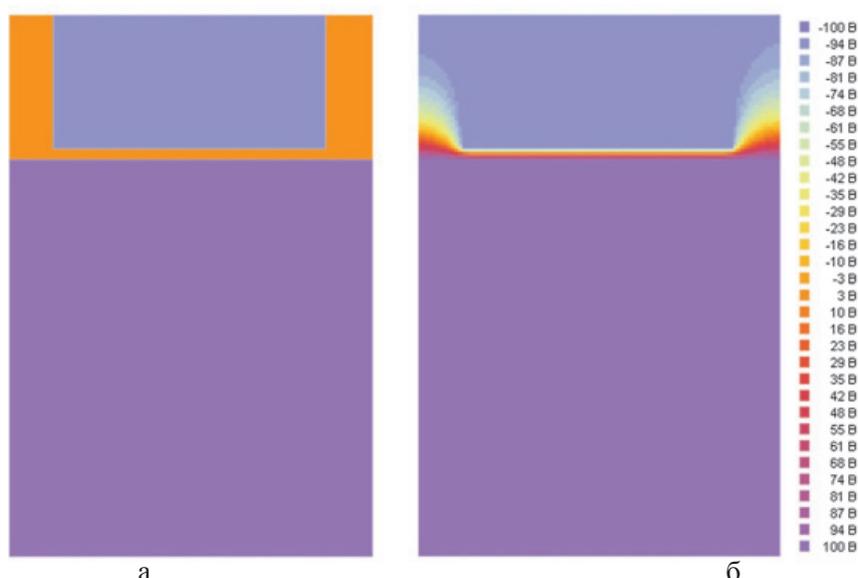


Рис. 3. Распределение электрических потенциалов в зоне обработки:  
а – до начала расчета электростатического поля; б – после вычисления электростатического поля

Принимая допущение, что продукты эрозии являются частицами проводника, и их наличие в РЖ уменьшает линейные размеры той области ячейки, которая занята диэлектриком, введем в модель линейную зависимость электрической прочности ячейки от концентрации  $K_3$  продуктов эрозии в ней:

$$E_{\text{пр.з}} = E_{\text{пр}} \left( 1 - \frac{K_3}{100\%} \right), \quad (2)$$

где  $E_{\text{пр.з}}$  – напряженность пробоя ячейки РЖ, загрязненной продуктами эрозии, В/м;  $E_{\text{пр}}$  – номинальная напряженность пробоя чистой РЖ, В/м.

Учитывая выражение (2), определяется напряженность электрического поля для ячеек РЖ.

Полученная математическая модель пробоя межэлектродного промежутка имеет вид:

$$\begin{cases} h_{\text{МЭП}} \approx h_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{и}}}{E_{\text{пр}}}; \\ E_{\text{пр.з}} = E_{\text{пр}} \left( 1 - \frac{K_3}{100\%} \right), \end{cases}$$

где  $h_{\text{МЭП}}$  – номинальный размер МЭП, м;  $h_{\text{пр}}$  – размер пробиваемого МЭП, м;  $U_{\text{и}}$  – напряжение импульса, В;  $E_{\text{пр}}$  – номинальная напряженность пробоя чистой РЖ, В/м;

$E_{\text{пр.з}}$  – напряженность пробоя РЖ, загрязненной продуктами эрозии, В/м;  $K_3$  – концентрация продуктов эрозии в РЖ, %.

Следует отметить, что наибольшая напряженность электрического поля наблюдается на углах ЭИ. Если для какой-либо ячейки напряженность электрического поля больше, чем напряженность пробоя, то разряд в МЭП возможен, и происходит расчет траектории образования электрической дуги.

В данной компьютерной модели эрозионные лунки в ЭЗ образуются после каждого разряда, а в ЭИ – с вероятностью, равной коэффициенту относительного износа инструмента, то есть, если в модели задан коэффициент относительного износа ЭИ, равный 6%, то эрозионная лунка будет образовываться в среднем после попадания  $1/0,06 \approx 16$  разрядов в одну и ту же ячейку ЭИ.

#### Модель движения продуктов эрозии в межэлектродном зазоре

Для имитации движения продуктов эрозии в РЖ в данной компьютерной модели используется клеточно-автоматная модель FHP-EP (erosion products). Модель FHP-EP базируется на клеточно-автоматной модели потока FHP-MP [4], в которой допускается более одной частицы в клетке с равными векторами скорости. Модель FHP-MP является обобщением классической модели на булевых векторах FHP (Frish, Hasslacher, Pomeau) [5].

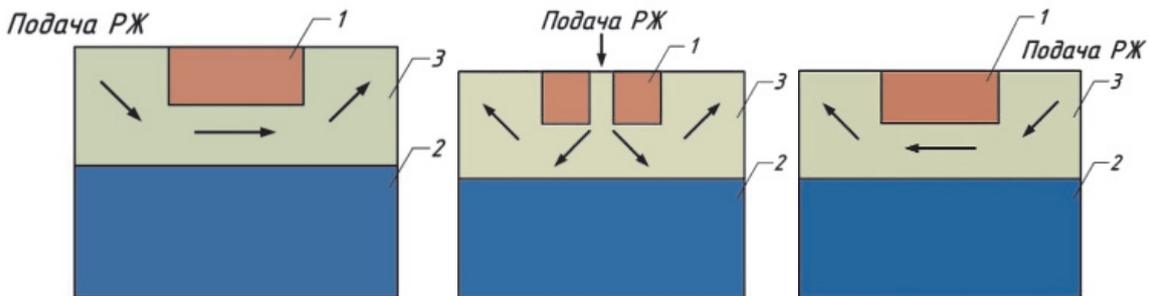


Рис. 4. Направления движения рабочей жидкости при различных режимах принудительной прокачки. 1 – электрод-инструмент; 2 – электрод-заготовка; 3 – рабочая жидкость

Для имитации прокачки РЖ через МЭП в данной компьютерной модели также используется клеточно-автоматная модель FHP-EP. Каждой частице продуктов эрозии придается дополнительный импульс в соответствии с направлением прокачки РЖ.

После каждой операции расчета движения продуктов эрозии цикл работы компьютерной модели повторяется, то есть происходит новый расчет электростатического поля в зоне обработки с учетом появления новой эрозионной лунки и нового положения продуктов эрозии, а затем производится новый расчет пробоя РЖ.

Если при расчете пробоя выяснится, что пробой невозможен, вследствие слишком большого расстояния между электродами, то модель произведет опускание ЭИ вниз на высоту одной ячейки сеточной модели. При этом частицам продуктов эрозии, расположенным непосредственно под ЭИ, будет придан дополнительный импульс, направленный вниз, и модель выполнит соответствующую операцию расчета движения продуктов эрозии.

#### Эксперименты и их обсуждение

Для исследования влияния скорости потока РЖ в МЭЗ на точность формообразования

при ЭЭО была проведена серия компьютерных экспериментов. В качестве изменяемого параметра использовалась скорость  $V$  потока РЖ в МЭЗ при постоянных значениях напряжения  $U$ , подаваемого на электроды. Рабочая среда – керосин, напряжение 160 В, режимы принудительной прокачки – «прокачка РЖ вправо» и «прокачка РЖ через ЭИ». Для упрощения расчета канал в инструменте принимался бесконечно узким.

Погрешность формообразования вычислялась по формуле:

$$\Delta = \frac{S_{\text{факт}} - S_{\text{ном}}}{S_{\text{ном}}},$$

где  $S_{\text{факт}}$  – количество фактически удаленного материала со стенок прошиваемого

отверстия;  $S_{\text{ном}}$  – номинальное (расчетное) количество материала, которое должно быть удалено со стенок прошиваемого отверстия.

Величина  $S_{\text{ном}}$  рассчитывается следующим образом:

$$S_{\text{ном}} = 2h \cdot d,$$

где  $h$  – высота прошиваемого отверстия;  $d$  – расчетная величина пробивного зазора.

Величина  $S_{\text{факт}}$  вычисляется по имитационной модели путем подсчета ячеек фактически удаленного материала.

Результаты компьютерных экспериментов представлены в таблице, графики полученных зависимостей  $f = D(V)$  представлены на рис. 5.

Результаты компьютерных экспериментов

$V, \text{ м/с}$	0,005	0,01	0,016	0,021	0,042	0,063	0,084	0,168	0,336
$U, \text{ В}$	Погрешность формообразования $\Delta, \%$								
	<i>Прокачка РЖ вправо</i>								
160	300	244	204	112	69	52	43	29	19
	<i>Прокачка РЖ через ЭИ</i>								
160	419	403	362	195	110	86	70	45	23

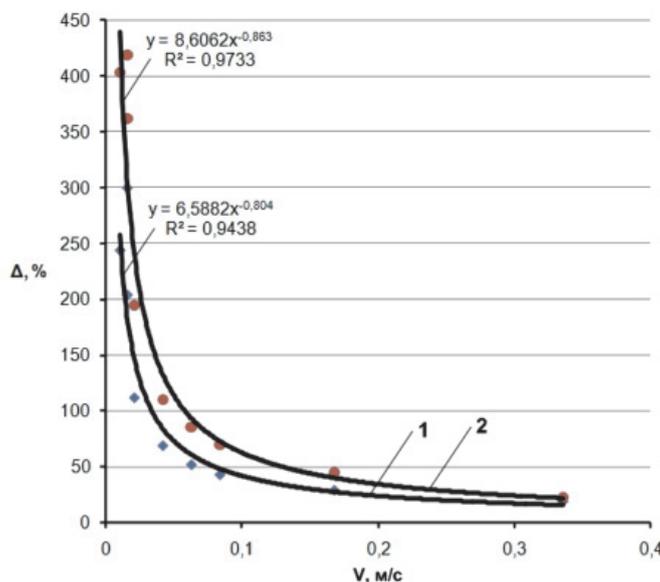


Рис. 5. Зависимость погрешности формообразования  $D$  от скорости  $V$  потока рабочей жидкости в межэлектродном зазоре:  
1 – режим «прокачка РЖ вправо»; 2 – режим «прокачка РЖ через ЭИ»

Анализ графиков показывает, что зависимость погрешности формообразования  $D$  от скорости  $V$  потока РЖ носит степенной характер вида  $D = aV^{-b}$ , где  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты. Причем степенной характер этой зависимости прослеживается очень четко – среднеквадратичное отклонение от степенного закона составляет 2,5% для режима «прокачка РЖ через

ЭИ» и 5,5% для режима «прокачка РЖ вправо».

**Заключение**

Проведенные компьютерные эксперименты подтвердили адекватность разработанной имитационной модели процесса электроэрозионной обработки. Погрешность между экспериментальными

и полученными с помощью модели результатами не превысила 6%.

В результате имитационного моделирования процесса образования единичных разрядов в межэлектродном промежутке установлено, что происходит повышенный износ электрода-инструмента на углах в связи с концентрацией в этих местах силовых линий напряженности электрического поля.

При имитационном моделировании процесса образования продуктов эрозии в результате каждого единичного разряда установлено, что суммарное действие износа электрода-инструмента и продуктов эрозии изменяет величину межэлектродного зазора и, как следствие, форму и размеры обрабатываемого отверстия.

Зависимость погрешности формообразования  $D$  при ЭЭО от скорости  $V$  потока рабочей жидкости в МЭМ носит степенной характер вида  $D = aV^{-b}$ , где  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты.

#### Список литературы

1. Размерная электрическая обработка металлов / Б.А. Артамонов и др.; под ред. А.В. Глазкова. – М.: Высш. шк., 1978. – 336 с.
2. Зингерман А.С. Электрическая обработка металлов. – Л.: Mashgiz, 1958. – 26 с.
3. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. В 2 т. Т.1. Обработка материалов с применением инструмента / Б.А. Артамонов, Ю.С. Волков, В.И. Дрожалова и др.; под ред. В.П. Смоленцева. – М.: Высш. шк., 1983. – 247 с., ил.
4. Медведев Ю.Г. Моделирование потоков жидкости решетчатом газом с кратными векторами скорости частиц //

Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах: материалы международной конференции, Казань, 17–19 ноября 2008.

5. Frisch, U., Hasslacher, B., Pomeau Y. Lattice-Gas automata for Navier-Stokes equations / U. Frisch, B. Hasslacher, Y. Pomeau // Phys. Rev. Lett. – 1986. – №56. – P. 1505.

#### References

1. Artamonov B.A. Razmernaja jelektricheskaja obrabotka metallov / B.A. Artamonov i dr.; Pod red. A.V. Glazkova. M.: Vyssh. Shkola, 1978. 336 p.
2. Zingerman A.S. Jelektricheskaja obrabotka metallov/ A.S. Zingerman. L.: Mashgiz, 1958. 26 p.
3. Artamonov, B.A. Jelektrofizicheskie i jelektrohimicheskie metody obrabotki materialov. V 2 t. T.1. Obrabotka materialov s primeneniem instrumenta / B.A. Artamonov, Ju.S. Volkov, V.I. Drozhalova i dr.; Pod red. V.P. Smolenceva. M.: Vyssh. shk., 1983. 247 p., il.
4. Medvedev, Ju.G. Modelirovanie potokov zhidkosti reshetchatym gazom s kratnymi vektorami skorosti chastic // Materialy mezhdunarodnoj konferencii «Vysokoproizvoditel'nye parallel'nye vychislenija na klasternyh sistemah», Kazan', 17-19 nojabrja 2008 g.
5. Frisch, U., Hasslacher, B., Pomeau Y. Lattice-Gas automata for Navier-Stokes equations / U. Frisch, B. Hasslacher, Y. Pomeau // Phys. Rev. Lett. 1986. no. 56. pp. 1505.

#### Рецензенты:

Черномас В.В., д.т.н., профессор, зав. лабораторией «Новые технологии в металлургии» УРАН ИММ ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре;

Муравьев В.И., д.т.н., профессор кафедры «Технологии сварочного производства» ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», г. Комсомольск-на-Амуре.

Работа поступила в редакцию 28.08.2012.