

УДК 621.9.048

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ВЫРЕЗКИ НЕПРОФИЛИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ-ИНСТРУМЕНТАМИ

А. Н. ЗАЙЦЕВ<sup>1</sup>, Т. Р. ИДРИСОВ<sup>2</sup>, Р. М. САЛАХУТДИНОВ<sup>3</sup>,  
В. А. ЗАЙЦЕВ<sup>4</sup>, В. П. ЖИТНИКОВ<sup>5</sup>

<sup>1</sup>znagaeo@yandex.ru, <sup>2</sup>idrisov.tr@mail.ru, <sup>3</sup>salahutdinow.r@yandex.ru,  
<sup>4</sup>vzaitsev@stan-group.com, <sup>5</sup>zhitnik@mail.ru

<sup>1, 3, 5</sup> ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)  
<sup>2, 4</sup> ООО НПО «Станкостроение» (г. Стерлитамак)

*Поступила в редакцию 25.12.2019*

**Аннотация.** Рассмотрена технологическая схема электрохимической обработки круглым и пластинчатым непрофилированным электродом-инструментом. Разработаны две расчетные модели процесса электрохимического формообразования узкого паза по новой технологической схеме. Первая модель основана на применении методов теории функций комплексного переменного. Решение нестационарной задачи на каждом временном шаге определяется с помощью интеграла Шварца. Вторая модель использует интеграл Грина и метод граничных элементов. Сравнение решений двумя методами тестовой задачи показало их совпадение с оцененной точностью. Выполнена экспериментальная проверка расчетных данных. Описана конструкция многокоординатного электрохимического станка, приведены примеры обработанных деталей.

**Ключевые слова:** электрохимическая обработка; непрофилированный электрод-инструмент; математическое моделирование; электрохимическая прорезка паза.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия возрос интерес к использованию электрофизических и электрохимических методов обработки (ЭМО), использующих современные технологические схемы генерации поверхности с высокой степенью прерывистости. Одним из таких методов является электрохимическая обработка (вырезка, фрезерование и др.), осуществляемая за счет многокоординатного движения непрофилированного проволочного или стержневого электрода-инструмента (ЭИ) [1–10].

Темой настоящей статьи является электрохимическая вырезка непрофилированными электродами-инструментами. Данная

схема имеет ряд важных технологических преимуществ по сравнению с аналогичными конкурирующими технологиями металлообработки: механического резания и электроэрозионной проволочной вырезки. Сюда следует отнести отсутствие износа инструмента, отсутствие заусенцев, острых кромок и дефектных слоев на обработанной поверхности. Данная технология находит применение в массовом производстве и при производстве уникальных деталей, не допускающих значительного термического и механического воздействия, например вырезка пластин Zr [11].

В статье предложена новая технологическая схема электрохимической вырезки. Тех-

ническая новизна и актуальность новых решений положительно оценена экспертизой Роспатента, на основании чего авторам был выдан патент (Патент РФ 2647413) [12].

Задачей настоящей работы является разработка математического описания процесса электрохимического формообразования по новой технологической схеме электрохимической вырезки непрофилированным электродом-инструментом с целью последующего построения на ее основе программных модулей систем САПР и САУ для многокоординатных станков с ЧПУ.

Применение той или иной схемы обусловлено технологическими и конструктивными особенностями прорезаемого паза и экономической целесообразностью. Так, для электродов-инструментов круглого сечения не требуется вращение, что удешевляет станок, однако прокачка электролита по концентричному соплу имеет технологические ограничения для наклонных и криволинейных пазов. Напротив, вырезка вращающимся пластинчатым электродом-инструментом требует более сложной и дорогой конструкции станка, однако позволяет улучшить прокачку электролита.

#### ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперименты проводились на универсальном электрохимическом станке, модернизированном для вырезки пазов проволочным электродом. Схема обработки приведена на рис. 1. Электролит подавался вдоль проволоки через сопло. Обрабатываемый материал – сталь 40Х13, диаметр электрода-инструмента – 0,1 мм, электролит – 8 %  $\text{NaNO}_3$ , температура электролита – 20 °С.

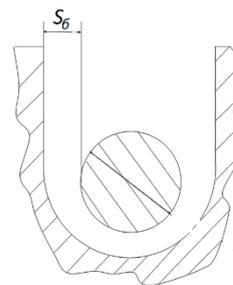


Рис. 1. Схема обработки проволочным электродом

Результаты экспериментов по оценке достижимой ширины  $L$  паза в зависимости от напряжения  $U$  на электродах при различных скоростях подачи электрода-инструмента (1,5 мм/мин, 1 мм/мин, 0,5 мм/мин) приведены на рис. 2. По этому показателю предлагаемая технология соответствует наиболее востребованному в промышленности значению  $L = 0,1 \dots 0,2$  мм, характерному для электроэрозионных вырезных станков.

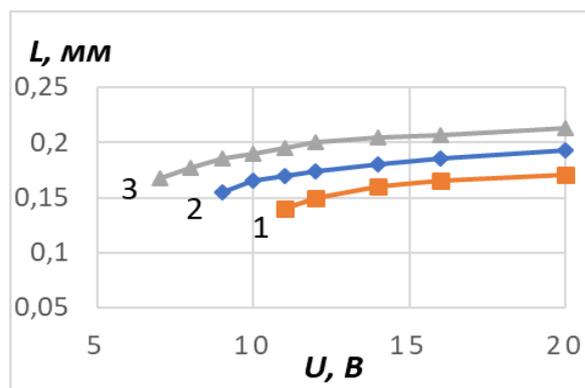


Рис. 2. Зависимость ширины паза от напряжения при скорости подачи электрода-инструмента:  
ряд 1 – 1,5 мм/мин, ряд 2 – 1 мм/мин,  
ряд 3 – 0,5 мм/мин

На рис. 3 показан результат наложения расчетного профиля паза на реальный профиль. Как видно из рисунка, основная поверхность реза (зона «а») соответствует расчетному значению с погрешностью не более 5...10 мкм, погрешность в торцевой зоне выше в связи со сложностью учета тепловых и газогидродинамических процессов. Но при сквозных пазах эта зона отсутствует. Уточнение модели для снижения погрешности входной кромки является задачей дальнейших исследований.



Рис. 3. Фотография паза и наложенный расчетный профиль паза

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ВЫРЕЗКИ

#### Постановка задачи

Рассмотрим нестационарную задачу электрохимической обработки с помощью электрода-инструмента некоторой формы. ЭИ заглубляется в изначально плоскую заготовку со скоростью  $V_{et}$  под прямым углом к поверхности. Начальный межэлектродный зазор (расстояние  $CD$ ) равен  $S_0$ , разность потенциалов между электродами равна  $U$ . Форма межэлектродного пространства (МЭП) показана на рис. 4. Здесь  $FA$  и  $GB$  – берега условного разреза, проведенного по

линии тока, уходящей на бесконечность (т. е.  $A, A', B, B'$  – одна точка, удаленная на бесконечность).

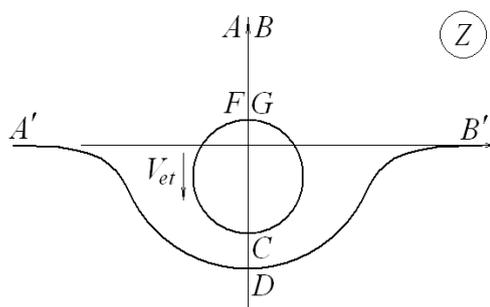


Рис. 4. Схема МЭП (физическая плоскость  $Z$ ):  $FCG$  – ЭИ (катод);  $A'D'B$  – обрабатываемая поверхность (анод)

При допущении идеальности среды для решения задачи можно применить методы теории функций комплексного переменного. Рассматриваемая задача является разновидностью задачи Хеле-Шоу со свободной границей и решается с помощью конформных отображений.

В решении задачи используется идея метода Леви-Чивиты – разделить искомую функцию на две части. Первая из них записывается в аналитическом виде и учитывает особенности функции (бесконечности и т. п.). Можно сказать, что она является грубым приближением решения. Вторая часть определяется численно и позволяет исправить грубое приближение. Поскольку она не содержит особенностей, ее проще найти численно.

Пусть  $Z = X + iY$ ,  $z = Z/l = x + iy$ . В связи с эквипотенциальностью электродов форма области МЭП на плоскости комплексного потенциала  $W = \varphi + i\psi$  ( $\varphi$  – потенциал электрического поля,  $\psi$  – функция тока) представляет собой прямоугольник (рис. 5, а). При этом величина напряженности электрического поля определяется производной

$$E = \left( \frac{dW}{dZ} \right),$$

а плотность тока в соответствии с законом Ома  $j = kE$ . В каждый момент времени задача сводится к определению конформного отображения области МЭП физической плоскости на прямоугольник плоскости  $W$ .

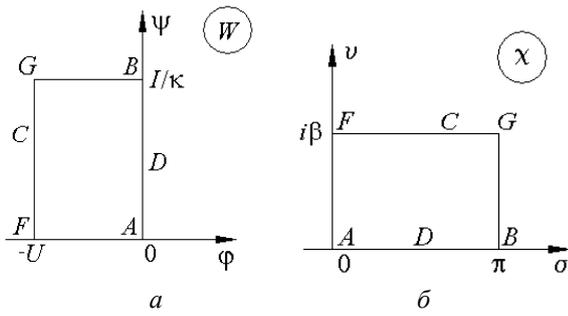


Рис. 5. Формы образов МЭП:

*a* – на плоскости комплексного потенциала;  
*б* – на параметрической плоскости  $\chi$

Конформно отобразим область МЭП на прямоугольник параметрической плоскости  $\chi$  (рис. 5, б). Тогда связь плоскостей  $\chi$  и  $W$  осуществляется функцией

$$W = i \frac{U}{\beta} \chi. \quad (1)$$

Перейдем к безразмерным величинам  $x, y, \tau, w$ :

$$x = X/l, \quad y = Y/l, \quad \tau = \frac{V_{et}}{l} t = k\eta_0 U t / l^2, \quad (2)$$

$$w = W/U,$$

где  $t$  – время;  $l = k\eta_0 U / V_{et}$  – величина стационарного зазора в задаче об обработке плоским горизонтальным ЭИ. При этом

$$v_{et} = - \frac{dy}{d\tau} A' = 1.$$

*Метод конформных отображений*

Для отображения  $\chi$  на физическую плоскость  $z$  сначала рассмотрим функцию

$$z_0 = -i \frac{e^{2i\chi} + 1}{e^{2i\chi} - 1} = -\text{ctg } \chi. \quad (3)$$

Функция  $gz_0 = -g \text{ctg } \chi$ ,  $g = \sqrt{h^2 - r^2}$ ,

$$\beta = -\frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{h+r} - \sqrt{h-r}}{\sqrt{h+r} + \sqrt{h-r}}$$

отображает прямоугольник плоскости  $\chi$  на верхнюю полуплоскость с вырезанным кругом. Функция (3) имеет главную особенность основного отображения  $z(\chi): z(\chi) \sim 1/\chi$  в точке  $\chi = 0$ . Других особенностей функция  $z(\chi)$  не имеет, поскольку внутренние углы излома границ в точках  $F$  и  $G$  равны  $\pi/2$  как на плоскости образа, так и на плоскости прообраза. Поэтому решение общей задачи на параметрической плоскости  $\chi$  удобно искать в виде суммы

$$z(\chi, \tau) = g(\tau)z_0(\chi) + z_1(\chi, \tau), \quad (4)$$

где  $z_1(\chi, \tau)$  – функция, определяющая отличие формы МЭП от представленной на рис. 4, а. Поскольку функция  $z_1(\chi, \tau)$  не имеет особенностей, ее проще искать численно-аналитическим методом.

Метод определения функции  $z_1(\chi, \tau)$  на каждом временном шаге и переход к следующему шагу описан в [13, 14] при решении задачи копирования.

*Численные результаты*

На рис. 6 представлены результаты решения задачи для двух значений безразмерного радиуса ЭИ  $r = R/l$ .

Вблизи ЭИ видно образование стационарного процесса (кривые, соответствующие стационарным решениям, обозначены буквой  $S$ ). Вблизи области внедрения ЭИ в заготовку образуется финальная форма (рис. 7), которая может быть получена только при решении нестационарной задачи.

Финальные формы для трех значений безразмерного радиуса ЭИ показаны на рис. 8 (кривые 1, 2, 3 соответствуют  $r = 1; 2,5; 5$ ).

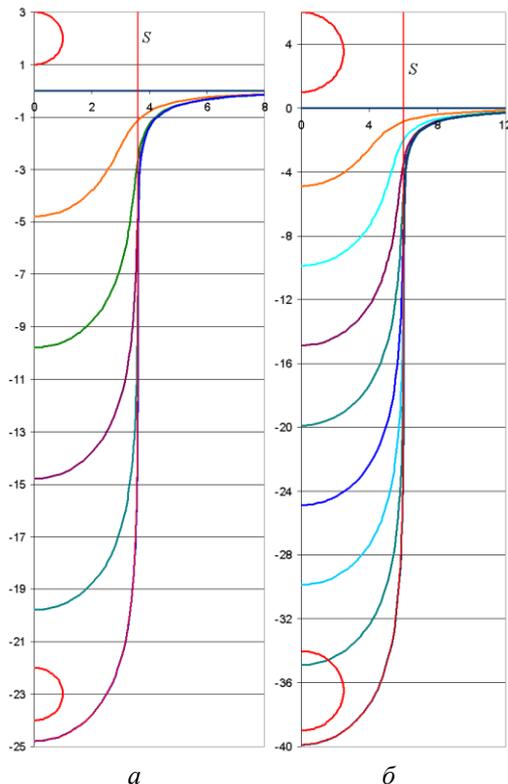


Рис. 6. Формы нестационарных поверхностей при обработке круглым ЭИ для  $s_0 = 1, \Delta\tau = 5$ :  
*a* –  $r = 1$ ; *б* –  $r = 2,5$

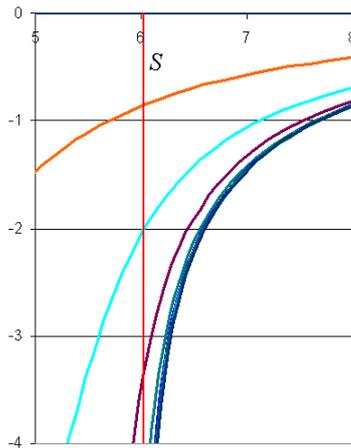


Рис. 7. Образование финальной формы ( $r = 2,5$ )

При обработке в пассивирующих электролитах, к которым относится раствор  $\text{NaNO}_3$ , существует критическое значение плотности тока  $j_{cr}$ , и если на участке поверхности анода плотность тока  $j < j_{cr}$ , то растворения на этом участке практически не происходит. В расчетах характерным параметром является отношение  $\gamma = j_{max}/j_{cr}$ , где  $j_{max}$  – значение плотности тока в точке  $D$ . На рис. 6–8  $\gamma = \infty$ , на рис. 3  $\gamma = 2$ .

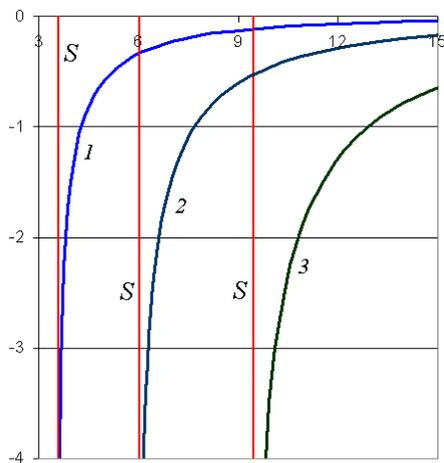


Рис. 8. Финальные формы входной кромки обрабатываемой поверхности

Оценка погрешности численного решения в данной работе проводилась методом, подробно изложенным в [15]. Исследования показали, что погрешность не превышает четырех значащих цифр. Кроме того, эта задача решалась методом граничных элементов,

рассмотренном в следующем разделе. Результаты расчетов и оценок сравнивались, что позволило проверить реализацию обоих методов.

#### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ВЫРЕЗКИ ПЛАСТИНЧАТЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Рассмотрим нестационарную задачу ЭХО с помощью пластинчатого ЭИ конечной толщины. Форма межэлектродного пространства показана на рис. 9. Центр ЭИ движется внутри заготовки со скоростью  $V_C$  вниз вдоль оси ординат. Одновременно ЭИ вращается относительно своего центра с угловой скоростью  $\omega$ . Начальное отверстие в заготовке имеет некоторую форму (обычно круглую), разность потенциалов между электродами равна  $U$ . Процесс электрохимического растворения материала анода определяется законами Фарадея и Ома [16]

$$V_{ectm} = kE, \quad E = j/\kappa, \quad k = \kappa\eta\varepsilon/\rho, \quad (5)$$

где  $V_{ectm}$  – скорость электрохимического растворения (сдвига границы);  $E, j$  – напряженность и плотность тока на границе анода;  $\kappa$  – электропроводность электролита;  $\eta$  – выход по току;  $\varepsilon$  – электрохимический эквивалент;  $\rho$  – плотность растворяемого материала.

Электрическое поле считается потенциальным и соленоидальным, поэтому потенциал  $\Phi(X, Y)$  удовлетворяет уравнению Лапласа  $\Delta\Phi = 0$ .

На границах, соответствующих электродам, значения потенциала на аноде и катоде равны

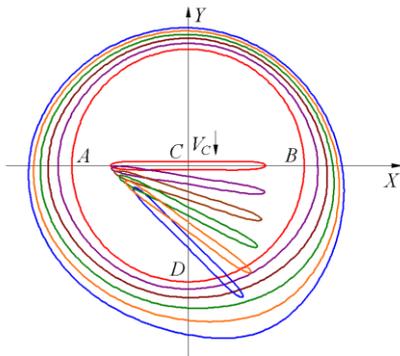
$$\Phi_a = 0, \quad \Phi_c = -U.$$

Безразмерные величины  $x, y, \tau$  и  $\varphi$  определяются аналогично (2).

Центр ЭИ движется, как показано на рис. 9 со скоростью  $V_C$ .

При этом

$$v_C = -\frac{dy_C}{dt} = -\frac{1}{V_C} \frac{dY_C}{dt} = 1.$$



**Рис. 9.** Схема МЭП: ADB – обрабатываемая поверхность (анод); C – ЭИ (катод)

Граница детали также подвижна, нормальная скорость ее движения определяется уравнением (1). Представим (1) в безразмерном виде

$$\frac{dx_a}{d\tau} = \frac{\partial\varphi}{\partial n} \cos n, \quad \frac{dy_a}{d\tau} = \frac{\partial\varphi}{\partial n} \sin n. \quad (6)$$

Здесь  $x_a(\tau)$ ,  $x_a(l, t)$ ,  $y_a(l, t)$  – координаты точек на обрабатываемой поверхности (ОП);  $n$  – единичный вектор внешней нормали к ОП.

Перемещение точек поверхности ЭИ в процессе обработки можно определить следующим образом

$$\begin{aligned} x_c(\tau) &= \operatorname{Re} \left[ (x_c^0 + iy_c^0) e^{i\alpha(\tau)} \right], \\ y_c(\tau) &= -\tau + \operatorname{Im} \left[ (x_c^0 + iy_c^0) e^{i\alpha(\tau)} \right], \end{aligned} \quad (7)$$

где  $x_c^0$ ,  $x_a(l, t)$ ,  $y_a(l, t)$  – координаты точек на исходной поверхности ЭИ (при  $\tau = 0$ );  $\alpha(\tau) = -\omega\tau$  – угол поворота ЭИ вокруг своей оси относительно начального положения (на рис. 10 угол  $\alpha$  изменяется от 0 до  $-\pi/2$ ).

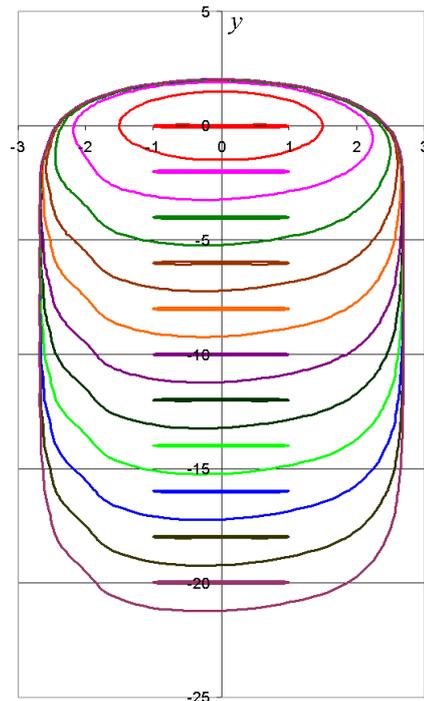
При численном решении безразмерное время дискретизируется, т. е. разбивается на некоторое количество шагов, на каждом шаге решается краевая задача для уравнения Лапласа  $\Delta\varphi = 0$  с условиями  $\varphi_a = 0$ ,  $\varphi_c = -1$ . (8)

При этом определяются нормальные производные  $\partial\varphi/\partial n$ . Далее согласно (6) и (7) производится шаг по времени (например, по методу Эйлера). Далее процесс повторяется.

Решение краевой задачи для уравнения Лапласа с граничными условиями первого рода (8) на основе интеграла Грина сводится к граничному интегральному уравнению [4, 17]. Для решения интегрального уравнения

будем использовать метод граничных элементов. Для упрощения расчетов, следуя [4, 17], будем использовать постоянные граничные элементы, в которых напряженность электрического поля имеет постоянные значения. При этом граница  $\Gamma$  разбивается на  $n$  прямолинейных элементов.

Приведены формы границ для различных значений круговой частоты вращения ЭИ  $\omega = \pi/2$  для  $\tau = 0, 2, 4, \dots, 20$  (рис. 10).



**Рис. 10.** Формы обрабатываемой поверхности

### РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

В станкостроительной группе компаний «Стан» (<https://www.stan-company.ru/>) разработан трехкоординатный электрохимический станок модели СТ2ЭКЧ3400/4000 (рис. 11) с числовым программным управлением. Данный станок предназначен для выполнения чистовых и финишных технологических операций по классической схеме «прямого копирования», электрохимического фрезерования и электрохимической вырезки непрофилированным электродом-инструментом деталей из высокопрочных сталей и сплавов. При этом 2D электрохимическая вырезка на глубину до 10–15 мм может быть осуществлена гладким цилиндрическим электродом-инструментом (стержнем) с прокачкой электролита вдоль образующей цилиндра через коаксиальное сопло.

Электрохимическая 3D-вырезка глубоких (более 20 мм) пазов на станке может осуществляться по предложенному авторами новому способу [12] с использованием вращающегося электрода-пластины.



Рис. 11. Станок электрохимический трехкоординатный

Основные узлы и системы станка построены на основе новых технических решений и включают три основных составляющих.

1. Исполнительная система представляет собой конструкцию, собранную из сварных деталей, и обладает достаточной жесткостью и термостабильностью. Применяемые на станке электроприводы обеспечивают бесступенчатое регулирование величин рабочих подач в широком диапазоне, что обеспечивает выбор оптимальных режимов обработки.

2. Электрическая система включает в себя генератор технологического тока и систему управления: генератор обеспечивает подачу через межэлектродный промежуток импульсного или постоянного электрического тока. В отличие от известных технических решений, генератор имеет расширенные возможности по заданию формы и параметров импульсов, а также интеллектуальную диагностику состояния. Ключевая часть генератора выполнена по усовершенствованной схеме с применением новых типов транзисторов и имеет меньшие габариты и тепловыделение. Система управления станком имеет удобный графический человеко-машинный интерфейс оператора, включает редактор, автоматизирующий процесс составления управляющих программ непосредственно на рабочей станции СЧПУ. Блоки управления строятся на базе современных быстродействующих микроконтро-

ллеров ARM архитектуры и с учетом специфики процессов электрохимической обработки (высокая помехозащищенность, цифровая обработка сигналов).

3. Электролитная система станка предназначена для подачи электролита в межэлектродный промежуток, а также для хранения и регенерации электролита. В состав электролитной системы входят следующие блоки:

- блок подачи электролита;
- блок терморегуляции электролита;
- блок корректировки показателя рН электролита;
- блок фильтрации электролита.

Все узлы электролитной станции находятся на одной платформе, имеют короткие гидравлические связи, для обеспечения безопасности и экологической чистоты закрыты одним общим кабинетом с возможностью доступа к основным узлам для обслуживания через дверцы.

На рис. 12, 13 показаны примеры деталей, обработанных с использованием технологий ЭХО НЭИ: боковые поверхности – методом электрохимической проволочной вырезки (wECM), а гравюра – методом электрохимического фрезерования ЭХФ/EC-Milling [18].

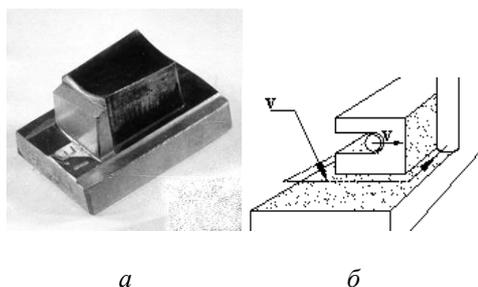


Рис. 12. Пуансон для изотермической штамповки: а – образец; б – схема обработки

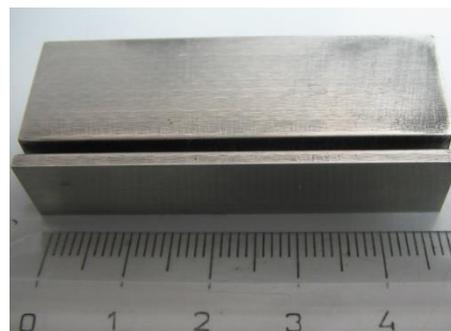


Рис. 13. Паз в образце из никелевого сплава

## ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель расчета профиля паза для новой технологической схемы процесса электрохимической вырезки непрофилированным, плоским, вращающимся электродом-инструментом. Также проведено экспериментальное и теоретическое исследование электрохимической вырезки непрофилированным, круглым в сечении электродом-инструментом. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных показали удовлетворительное с инженерной точки зрения совпадение.

Предложенное математическое описание процесса электрохимического формообразования по новой технологической схеме может быть использовано в качестве основы для последующего построения программных модулей систем САПР и САУ для многокоординатных станков с ЧПУ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Qu N. S., Ji H. J., Zeng Y. B.** Wire electrochemical machining using reciprocated traveling wire // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 72, No. 5. Pp. 677-683. [ N. S. Qu, H. J. Ji, Y. B. Zeng, "Wire electrochemical machining using reciprocated traveling wire", in *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 72, no. 5, pp. 677-683, 2014. ]
2. **Wire** electrochemical machining with axial electrolyte flushing for titanium alloy / Qu Ningsong, et. al. // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2013. Vol. 26, No. 1. Pp. 224-229. [ Qu Ningsong, et. al., "Wire electrochemical machining with axial electrolyte flushing for titanium alloy", in *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 26, no. 1, pp. 224-229, 2013. ]
3. **Wire** electrochemical machining with monodirectional traveling wire / Yongbin Zeng, et. al. Springer-Verlag London 2015. [ Yongbin Zeng, et. al., *Wire electrochemical machining with monodirectional traveling wire*, Springer-Verlag London, 2015. ]
4. **Волгин В. М., До Ван Донг, Давыдов А. Д.** Моделирование электрохимической обработки проволочным электродом-инструментом // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2013. Вып. 11. С. 122–136. [ V. M. Volgin, Do Van Dong, A. D. Davydov, "Modeling of electrochemical machining with wire electrode-tool", (in Russian), in *Izvestiya Tulsogo gosudarsvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, vol. 11, pp. 122-136, 2013. ]
5. **Chikamori K.** Electrochemical wire cutting method. U.S. Patent No. 4052274. 4 Oct. 1977. [ K. Chikamori, "Electrochemical wire cutting method", U.S. Patent No. 4052274, 1977. ]
6. **Itoh T.** Method and apparatus for electrically cutting work pieces with a wire electrode. U.S. Patent No. 4317019. 23 Feb. 1982. [ T. Itoh, "Method and apparatus for electrically cutting work pieces with a wire electrode", U.S. Patent No. 4317019, 1982. ]
7. **Bejar M. A., Eterovich F.** Wire-electrochemical cutting with a NaNO<sub>3</sub> electrolyte // *J. Materials Processing Tech.* 1995. Vol. 55, No. 3–4. Pp. 417-420. [ M. A. Bejar, F. Eterovich, "Wire-electrochemical cutting with a NaNO<sub>3</sub> electrolyte", in *J. Materials Processing Tech.*, vol. 55, no. 3-4, pp. 417-420, 1995. ]
8. **Zhu D., Wang K., Qu N. S.** Micro wire electrochemical cutting by using in situ fabricated wire electrode // *Annals of the CIRP*. 2007. Vol. 56, No. 1. Pp. 241-244. [ D. Zhu, K. Wang, N. S. Qu, "Micro wire electrochemical cutting by using in situ fabricated wire electrode", in *Annals of the CIRP*, vol. 26, no. 1, pp. 241-244, 2007. ]
9. **Micro** wire electrode electrochemical cutting with low frequency and small amplitude tool vibration / S. Wang et. al. // *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 53, No. 5-8. Pp. 535-544. [ S. Wang, et. al., "Micro wire electrode electrochemical cutting with low frequency and small amplitude tool vibration", in *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*, vol. 53, no. 5-8, pp. 535-544, 2011. ]
10. **Calculation** of the parameters of the technological-current density distribution during wire electrode electrochemical processing / V. I. Osipenko, et. al. // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2012. Vol. 48, No. 2. Pp. 105-110. [ V. I. Osipenko, et. al., "Calculation of the parameters of the technological-current density distribution during wire electrode electrochemical processing", in *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, vol. 48, no. 2, pp. 105-110, 2012. ]
11. **Проклова В. Д.** Электрохимическая обработка непрофилированным электродом-инструментом. М.: Машиностроение, 1976. 54 с. [ V. D. Proklova, *Electrochemical machining with non-profiled electrode-tool*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1976. ]
12. **Способ** электрохимической обработки непрофилированным электродом-инструментом и устройства для его осуществления / Р. М. Салахутдинов и др. // Патент РФ № 2647413. Опубл. 15.03.2018. Бюл. № 8. [ R. M. Salakhutdinov, et. al., "Method of electrochemical machining with non-profiled tube electrode-tool and apparatus for its realization", Patent RF 2647413, 2018. ]
13. **Житников В. П., Муксимова Р. Р., Зарипов А. А.** Моделирование прецизионной нестационарной электрохимической обработки круглым и пластинчатым электродом-инструментом // *Вестник УГАТУ*. 2015. Т. 19, № 1 (67). С. 92–99. [ V. P. Zhitnikov, R. R. Myksimova, A. A. Zaripov, "Modeling of the precision non-stationary electrochemical machining with circle and plate electrode-tool", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 19, no. 1 (67), pp. 92-99, 2015. ]
14. **Житников В. П., Шерыхалина Н. М., Зарипов А. А.** Моделирование электрохимического копирования в ячейке конечной ширины // *ПМТФ*. 2017. Т. 58, № 6. С. 167–176. [ V. P. Zhitnikov, N. M. Sherykhalina, A. A. Zaripov, "Modeling of the electrochemical copying in cell of restricted width", (in Russian), in *PMTF*, vol. 58, no. 6, pp. 167-166, 2017. ]
15. **Zhitnikov V. P., Sherykhalina N. M., Sokolova A. A.** Problem of Reliability Justification of Computation Error Estimates // *Mediterranean Journal of Social Sciences*. 2015. Vol. 6, No. 2. P. 65–78. [ V. P. Zhitnikov, N. M. Sherykhalina, A. A. Sokolova, "Problem of Reliability Justification of Computation Error Estimates", in *Mediterranean Journal of Social Sciences*, vol. 6, no. 2, pp. 65-78, 2015. ]
16. **Житников В. П., Зайцев А. Н.** Импульсная электрохимическая размерная обработка. М.: Машиностроение, 2008

413 с. [ V. P. Zhitnikov, A. N. Zaytsev, *Pulse electrochemical machining*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 2008. ]

17. **Житников В. П., Шерыхалина Н. М., Соколова А. А.** Моделирование электрохимической обработки вращающимся пластинчатым электрод-инструментом // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 06 (60). Часть 3. С. 127–132. [ V. P. Zhitnikov, N. M. Sherykhalina, A. A. Sokolova, "Modeling of the electrochemical machining with rotated plate electrode-tool", (in Russian), in *Mezhdunarodniy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, vol. 06 (60), no. 3, pp. 127-132, 2017. ]

18. **Зайцев А. Н., Житников В. П.** Моделирование процесса электрохимической размерной обработки непрофилированными трубчатыми электрод-инструментами // Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Тула: ТПИ, 1989. С. 12–19. [ A. N. Zaytsev, V. P. Zhitnikov, *Modeling of the process of electrochemical machining with non-profiled tube electrode-tool*, (in Russian). Tula: TPI, 1989. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**ЗАЙЦЕВ Александр Николаевич**, проф. каф. АТСЛ. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1972). Д-р техн. наук (Воронеж, ВПИ, 1993). Иссл. в обл. электрохим. обработки.

**ИДРИСОВ Тимур Рашитович**, нач. отд. технологич. иссл. процессов ЭХО НПО «Станкостроение». Дипл. магистр техники и технологии (УГАТУ, 1999). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2003). Иссл. в области электрохим. формообразования.

**САЛАХУТДИНОВ Ринат Мияссарович**, доц. каф. ТМ. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1971). Канд. техн. наук (МОССТАНКИН, 1981). Иссл. в обл. металлообрабатывающих станков.

**ЗАЙЦЕВ Вячеслав Александрович**, доцент. каф. СЛАТ. Дипл. инж. (УГАТУ, 2003). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. электрохим. обработки твердых сплавов.

**ЖИТНИКОВ Владимир Павлович**, засл. деятель науки РБ, проф. каф. ВМ и К. Дипл. инж.-физ. (МФТИ, 1973). Д-р физ.-мат. наук (Казанск. ун-т, 1993). Иссл. в обл. электрохимического формообразования, числ.-аналит. методов.

#### METADATA

**Title:** Experimental and theoretical study of electrochemical machining by non-profiled electrode tool.

**Authors:** A. N. Zaytsev<sup>1</sup>, T. R. Idrisov<sup>2</sup>, R. M. Salakhutdinov<sup>3</sup>, V. A. Zaytsev<sup>4</sup>, V. P. Zhitnikov<sup>5</sup>

#### Affiliation:

<sup>1, 3, 5</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

<sup>2, 4</sup> NPO "Stankostroenie" LLC (Sterlitamak), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> znagaeo@yandex.ru, <sup>2</sup> idrisov.tr@mail.ru,

<sup>3</sup> salahutdinov.r@yandex.ru, <sup>4</sup> vzaitsev@stan-group.com,

<sup>5</sup> zhitnik@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 24, no. 2 (88), pp. 50-58, 2020. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** Processes of electrochemical machining with a circle and plate electrode tool is considered. The description of the mechanic system of the machine for experimental investigation is given. The calculated models of the process of

forming a groove by a non-profiled electrode tool are developed. The samples of machined details are presented.

**Key words:** electrochemical processing; non-profiled electrode tool; mathematical modeling of the electrochemical process; control method.

#### About authors:

**ZAYTSEV, Alexander Nikolaevich**, Prof., Dept ATSL. DI. Eng.-mech. (UAI, 1972). Dr. of Tech. Sci. (Voronezh, VPI, 1993).

**IDRISOV, Timur Rashitovich**, Chief of Technological research department of ECM NPO "Stankostroenie". Dipl. Master of science in electronic engineering (UAI, 1999). Dipl Ph.D. (USATU, 2003).

**SALAKHUTDINOV, Rinat Miyassarovich**, Associate prof. at Dept Engineering Technology. DI. Eng.-mech. (UAI, 1971). PhD. in Tech. Sci. (MOSSTANKIN, 1981).

**ZAYTSEV, Vyacheslav Alexandrovich**, Chief of Hydraulic and regeneration systems department of NPO "Stankostroenie". Dipl. engineer (USATU, 2003). Dipl Ph.D. (USATU, 2005).

**ZHITNIKOV, Vladimir Pavlovich**, Prof., Dept. of computer science and robotics. Dipl. Engineer-physicist (Moscow Physical-Technical Inst., 1973), Dr. of Phys.-Math. Sci. (KSU, 1993).