

УДК 621.9.048

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МНОГОКООРДИНАТНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ВЫРЕЗКИ

А. Н. ЗАЙЦЕВ¹, Т. Р. ИДРИСОВ², Р. М. САЛАХУТДИНОВ³,
С. В. БЕЗРУКОВ⁴, Т. В. КОСАРЕВ⁵

¹znagaao@yandex.ru, ²idrisov.tr@mail.ru, ³salahutdinow.r@yandex.ru,
⁴bezrukov.sv@mail.ru, ⁵timakosarev@mail.ru

^{1,3} ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)
^{2,4,5} ООО НПО «Станкостроение» (г. Стерлитамак)

Поступила в редакцию 25.12.2019

Аннотация. Рассмотрен новый (защищен патентом РФ) способ многокоординатной электрохимической вырезки пластинчатым электродом-инструментом. Приведена технологическая схема и конструкция оригинального пластинчатого непрофилированного электрода-инструмента с изменяемым углом закрутки для электрохимической вырезки. Дано описание исполнительной системы станка. Предлагаемая кинематическая структура и компоновочное решение станка позволяют, кроме электрохимической вырезки и прошивки отверстий, выполнять обработку глухих пазов и сложных пространственных поверхностей.

Ключевые слова: электрохимическая обработка проволочным электродом-инструментом; исполнительная система станка; способ управления.

ВВЕДЕНИЕ

Электрохимическая обработка (ЭХО) – уникальный по своим технологическим возможностям метод обработки. Важнейшие преимущества его состоят в отсутствии физического износа инструмента, отсутствии на обработанной поверхности детали дефектных слоев, независимости выходных технологических показателей от прочности обрабатываемых материалов и др. Однако традиционная реализация ЭХО по классической схеме «прямого копирования» формы электрода-инструмента (ЭИ) на поверхности детали не всегда эффективна. В частности, значительные технические и технологические трудности возникают при изготовлении деталей сложной формы, имеющих большую площадь (низкая точность и качество поверхности, большая металлоемкость оборудования, высокая стоимость изготовления ЭИ, форма которого адекватна форме детали и др.).

Появление высокоточных многокоординатных станков с микропроцессорными системами ЧПУ, существенно возросший уровень теоретических представлений о механизме процесса анодного растворения, электрических и тепловых полей в электролизерах создали реальную основу для постановки и практического решения задач объемного электрохимического формообразования непрофилированными электродами [1–10].

В качестве основных преимуществ процесса электрохимической «проволочной» вырезки wЕСМ по сравнению с классическими схемами «прямого копирования» можно назвать следующие [11, 12]:

– снижение трудоемкости изготовления непрофилированного ЭИ, имеющего простую геометрическую форму рабочей поверхности;

– увеличение гибкости производства и сокращение сроков технологической подго-

товки производства и повышение в ней доли интеллектуального труда;

- возможность изготовления сложнофасонных поверхностей деталей простым по форме ЭИ;

- повышение стабильности и прогнозируемости процесса съема материала во всех точках обрабатываемой поверхности;

- возможность локального программируемого изменения режима энергетического воздействия;

- независимость выходных технологических показателей по точности, удельной производительности и качеству поверхности от размеров обрабатываемой детали;

- возможность применения маломощных источников питания для обработки поверхностей деталей большой площади и др.

Область эффективного применения ЭХО непрофилированными ЭИ определяется, во-первых, изготовлением сложнофасонных поверхностей и криволинейных пазов на деталях из высокопрочных и твердых материалов в условиях единичного и мелкосерийного производства и, во-вторых, технологической интеграцией с другими электрическими методами. Последнее (в силу высокой избирательности метода) позволяет создать программируемое распределение и сочетание параметров качества обрабатываемой поверхности.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ВЫРЕЗКИ

В ряде экспериментальных работ [11, 13–17] было показано, что 2D электрохимическая вырезка на глубину до 10–15 мм может быть осуществлена гладким цилиндрическим ЭИ (стержнем) с прокачкой электролита вдоль образующей цилиндра через коаксиальное сопло. Однако с усложнением формы 3D-вырезки и глубины паза (более 20 мм) прокачка по соплу не обеспечивает гарантированного обновления межэлектродной среды в МЭП.

Для решения такой задачи предложен новый оригинальный [18] способ электрохимической обработки вращающимся непрофилированным ЭИ, включающим подачу элек-

тролита в зону обработки через сопло, по которому обработку осуществляют многокоординатным перемещением в несколько последовательных переходов ЭИ, выполненным в виде закрепленной с обоих концов длинной упругой пластины постоянного поперечного сечения, вращающейся вокруг продольной оси.

Причем первый переход можно осуществлять на постоянном напряжении, при этом оси начального и конечного одноименных поперечных сечений пластины повернуты относительно друг друга вокруг продольной оси на определенный угол сдвига γ , обеспечивая создание винтовой закрутки ЭИ. Последующие переходы осуществляют в пазе, предварительно полученном на первом переходе, при этом импульсы напряжения подают синхронно с вращением ЭИ, так же, как и при прорезке паза на импульсном напряжении, но со смещением фазы включения импульса и фазы выключения импульса на 90° относительно вектора скорости подачи в направлении к обрабатываемой начисто поверхности паза.

Для получения точности обработки необходимо обеспечить стабильность свойств межэлектродной среды по длине МЭП, которая может быть нарушена увеличением газонаполнения или вскипанием электролита, или возникновением кавитационных полостей.

Кавитационные явления возникают по причинам, связанным с характером движения потока электролита на участках МЭП, имеющих малые радиусы кривизны обтекаемых поверхностей при относительно высоких скоростях движения жидкости. Например, это возможно при высокой частоте вращения ЭИ либо при высоком входном давлении и большом МЭЗ и т. д. Кавитационные полости (каверны) заполнены парами электролита и газом и, как правило, возникают до подачи импульса тока на относительно больших зазорах. С уменьшением скорости относительного движения электролита, например, за счет уменьшения МЭЗ, входного давления и т. п. действий, кавитационные полости могут исчезнуть. Их появление приводит к увеличению электрического сопро-

тивления МЭП, которое может быть зарегистрировано в результате анализа формы импульсов тока и напряжения на МЭП. Так, например, возникновение кавитации контролируют по резкому, выше эмпирически определенной уставке R_{cav} возрастанию электрического сопротивления межэлектродного промежутка по переднему фронту импульса (рис. 1).

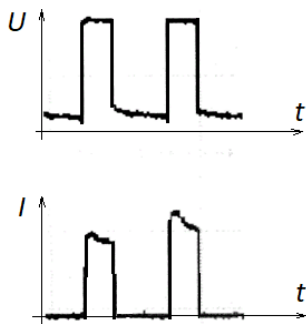


Рис. 1. Осциллограммы напряжения и тока в условиях возрастания электрического сопротивления МЭП

В качестве уставки R_{cav} может быть принято электрическое сопротивление МЭП на переднем фронте импульса при малых скоростях прокачки электролита, т. е. на скоростях прокачки, на которых изменение скорости не влияет на сопротивление МЭП по переднему фронту импульса. При этом следует учитывать, что измерение сопротивления МЭП производится после завершения переходных электрических процессов. При прорезке пазов в деталях постоянной толщины угол наклона винтовой линии устанавливают таким, чтобы обеспечить угол наклона продольных рисок на боковой поверхности к оси ЭИ в диапазоне $50-70^\circ$.

Повышение газонаполнения или вскипание электролита является следствием прохождения тока через электролит в МЭП. Интенсивность этих процессов возрастает в стадии увеличения МЭЗ. Следствием также является повышение электрического сопротивления МЭП, которое может быть зарегистрировано в результате анализа формы импульсов тока и напряжения на МЭП. Так, например, возникновение предельного газонаполнения и вскипание электролита контролируют по резкому, выше эмпирически определенной уставки R_{ags} возрастанию

электрического сопротивления МЭП по заднему фронту импульса (рис. 2).

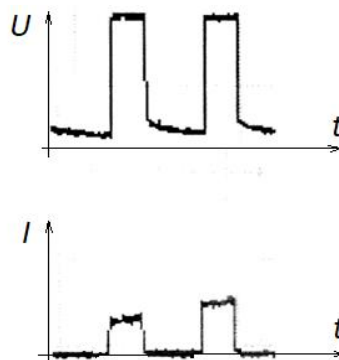


Рис. 2. Осциллограммы напряжения и тока в условиях предельного газонаполнения электролита

Таким образом, ограничение угла наклона винтовой линии и ограничение наибольшей частоты вращения ЭИ и минимальной величины МЭЗ (определяемой скоростью подачи) может быть определено по косвенному параметру – электрическому сопротивлению МЭП на переднем и заднем фронтах импульса. При этом процесс обработки ведут на оптимальном угле наклона винтовой линии рисок, максимально возможной скорости подачи и частоте вращения ЭИ, при которых не возникает значений электрического сопротивления МЭП по переднему и заднему фронтам импульсов, превышающих заданные. В качестве уставки может быть принято сопротивление МЭП, при котором рабочий ток снижается более чем на 80 %, что соответствует предельно допустимой величине газонаполнения МЭП.

В ряде случаев может оказаться удобным использование не абсолютных значений уставок сопротивления, а относительных эквивалентов, например отношения сопротивлений по переднему (заднему) фронту к минимальному сопротивлению МЭП в импульсе.

При осуществлении прорезки паза в режиме постоянного рабочего напряжения (рис. 3) начальное и конечное поперечные сечения ЭИ, выполненного в виде пластины, поворачиваются относительно друг друга на угол γ , обеспечивая винтовую закрутку пластины. Электролит подается вдоль продольной оси ЭИ, после чего запускают вращение ЭИ, подают постоянное рабочее напряжение и перемещают ЭИ по заданной траектории с

заданной скоростью. Наличие винтовой закрутки пластины способствует более интенсивному движению электролита вдоль оси ЭИ, за счет чего улучшаются условия эвакуации продуктов растворения из межэлектродного промежутка. В процессе обработки значение угла закрутки γ может оперативно изменяться для коррекции гидродинамических условий среды межэлектродного промежутка, например при изменении толщины прорезаемой заготовки.

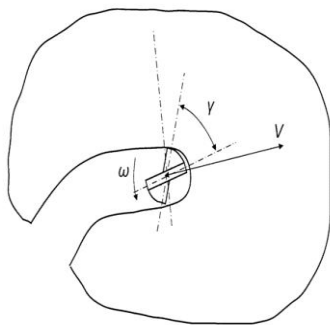


Рис. 3. Схема прорезки паза в режиме постоянного рабочего напряжения

При осуществлении прорезки паза в импульсном режиме (рис. 4) подача импульса рабочего напряжения осуществляется синхронно с вращением ЭИ, выполненного в виде пластины без создания закрутки. Одна из двух узких граней ЭИ принимается рабочей. В периоды времени, свободные от подачи рабочего напряжения, за счет вращения ЭИ обновляется межэлектродная среда и эвакуируются продукты реакции.

Включение импульса рабочего напряжения осуществляется в фазе $\varphi_0 + 2\pi n$ (n — число оборотов), зависящей от направления вектора скорости перемещения электрода V , выключение производится в фазе $1 + 2\pi(n + 1)$, причем выполняется условие $2\pi - \varphi_0 = \varphi_1$, за нулевое угловое положение принимается положение электрода, когда ось симметрии поперечного сечения, параллельная большей стороне, совпадает с вектором скорости.

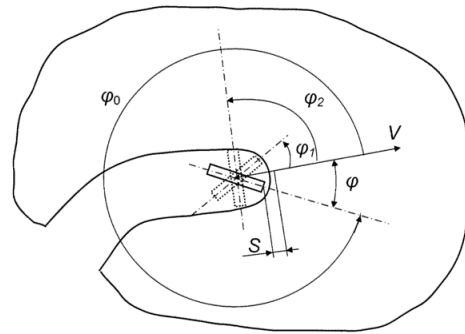


Рис. 4. Схема прорезки паза в импульсном режиме

Таким образом, включение импульса рабочего напряжения осуществляется в момент, когда ось симметрии поперечного сечения, параллельная большей стороне, образует с вектором подачи ЭИ угол $\varphi = 2\pi - \varphi_0 = \varphi_1$, названный углом включения импульса, выключение происходит после поворота инструмента на угол $2\pi\varphi$ (относительно момента включения), соответственно, длительность импульса напряжения зависит от скорости вращения ЭИ: $t_{и} = \varphi/\pi \cdot \omega$, где ω — угловая скорость. Значение угла φ определяет интенсивность процесса растворения и влияет на точность и ширину паза при заданной скорости перемещения ЭИ. При увеличении значений угла φ ширина прорезаемого паза увеличивается, при уменьшении значения угла φ паз становится уже. Пределы изменения значений угла включения напряжения ограничиваются интервалом от 0 до 90° , поскольку при значениях угла включения, больших 90° , эффекты, связанные с данным методом обработки, исчезают. За один оборот ЭИ может подаваться два импульса — в первом и во втором полупериодах вращения, что обусловлено симметрией электрода (в этом случае обе узкие грани электрода принимаются рабочими), также при слишком неблагоприятных условиях обновления межэлектродной среды возможно подавать один импульс на несколько оборотов.

При определенных значениях скорости подачи ЭИ, соотношении сторон его поперечного сечения и угла включения напряжения φ ширина прорезаемого паза может оказаться равной длине диагонали сечения, в этом случае при повороте в фазе, близкой к φ_2 , возникнет контакт электродов, при этом приостанавливается подача ЭИ, которая возобновляется, если при следующем обороте контакт отсутствует.

При осуществлении второго прохода в предварительно прорезанном при высокопроизводительных режимах пазе (рис. 5) импульсы рабочего напряжения подаются синхронно с вращением ЭИ, как и при прорезке паза в импульсном режиме, но со смещением фазы включения φ_0 и фазы выключения φ_1 на 90° относительно вектора скорости подачи в направлении к обрабатываемой начисто поверхности паза.

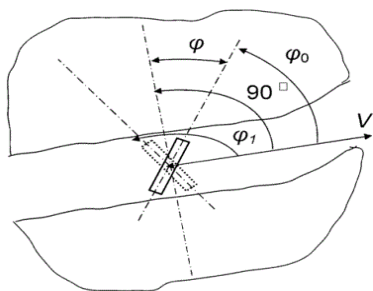


Рис. 5. Схема чистовой обработки паза

Осуществляется контроль состояния межэлектродной среды и эффективности процесса эвакуации продуктов растворения из МЭП по изменению проводимости, для чего процесс обработки прерывается, а именно выключаются импульсы рабочего напряжения и останавливается подача электрода (сохраняя его вращение) на время, необходимое для полного обновления межэлектродной среды, после чего включаются импульсы рабочего напряжения, в каждом импульсе измеряется ток и вычисляется средняя проводимость. От импульса к импульсу проводимость снижается до ее стабилизации, для минимизации разности проводимости чистого и зашламленного промежут-

ков изменяют частоту вращения ЭИ и/или скорость струи электролита, выходящей из сопла.

ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА СТАНКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ВЫРЕЗКИ

С учетом того, что электрохимическая вырезка осуществляется вращающимся в процессе обработки, закрученным и натянутым ЭИ в виде длинной упругой пластины, концы которого закреплены в двух соосных, разнесенных опорах (шпинделях), разработана новая конструкция исполнительных системы станка [18]. Кинематическая структура станка обеспечивает реализацию двух поступательных движений обрабатываемой детали в горизонтальной плоскости, вращение ЭИ и два угловых движения для наклона ее продольной оси в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Дополнительно для прошивки отверстия в заготовке предусмотрено осевое перемещение верхней опоры.

Компоновочное решение станка показано на рис. 6. На станине 1 станка смонтирован двухкоординатный планарный сервопривод 2, обеспечивающий перемещение консольно расположенного стола 3 для установки обрабатываемого изделия 4. В рабочей камере 5 на одноосных опорах 6, 7 установлена полурама 8, на которой расположена опора 9 рабочей головки-скобы 10, несущей ЭИ (поз. 11).

Расположение опор 6, 7 и 9 соответствует карданному подвесу, и требуемое для вырезки изделия с наклонной образующей изменение угла расположения продольной оси ЭИ обеспечивается соответствующим поворотом полурамы 8 и рабочей головки-скобы 10, осуществляемым серводвигателями 12, 13. Расположенные на концах рабочей головки-скобы 10 верхняя 14 и нижняя 15 опоры для закрепления ЭИ обеспечивают синхронное или независимое их вращение от отдельных приводов с серводвигателями 16, 17. Верхняя часть скобы 10 выполнена подвижной с возможностью изменения расстояния между верхней опорой 14 и столом 3 в соответствии с высотой обрабатываемого изделия 4.

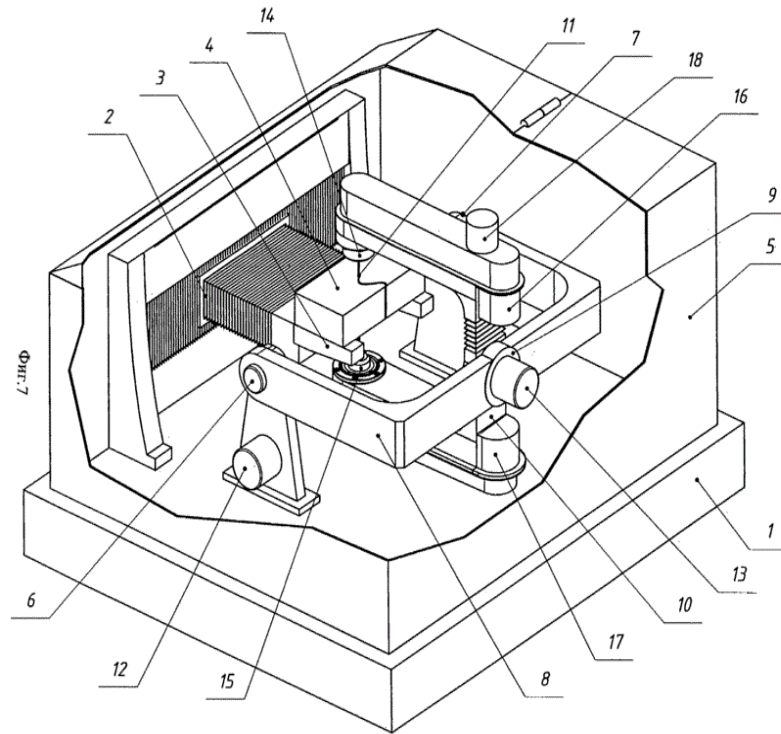


Рис. 6. Компонировка исполнительной системы станка

Для расширения технологических возможностей станка предусмотрено перемещение скобы 10 к столу 3 на скоростях рабочей подачи от отдельного привода с серводвигателем 18, что в случае закрепления в верхней опоре 14 стержневого ЭИ позволит осуществлять прошивку отверстий, в т. ч. технологических отверстий для заправки ЭИ.

Верхняя опора ЭИ (рис. 7) состоит из приводимого во вращение зубчатой ременной передачей 19 полого шпинделя 20, который смонтирован на двух разнесенных радиально-упорных подшипниках 21 с керамическими (для электроизоляции) телами качения. В отверстии шпинделя установлена сменная эксцентриковая втулка 22 с цанговым зажимом на конце для обеспечения необходимой центровки и закрепления ЭИ.

Система установочных отверстий на торце эксцентриковой втулки 22 и сопла 23 позволяет изменять их относительный угол поворота и формировать подаваемый через поворотную муфту 24 электролит в соосную с ЭИ струю. Ток подводится к верхней опоре ЭИ обеспечивается вращающимся контактным устройством 25.

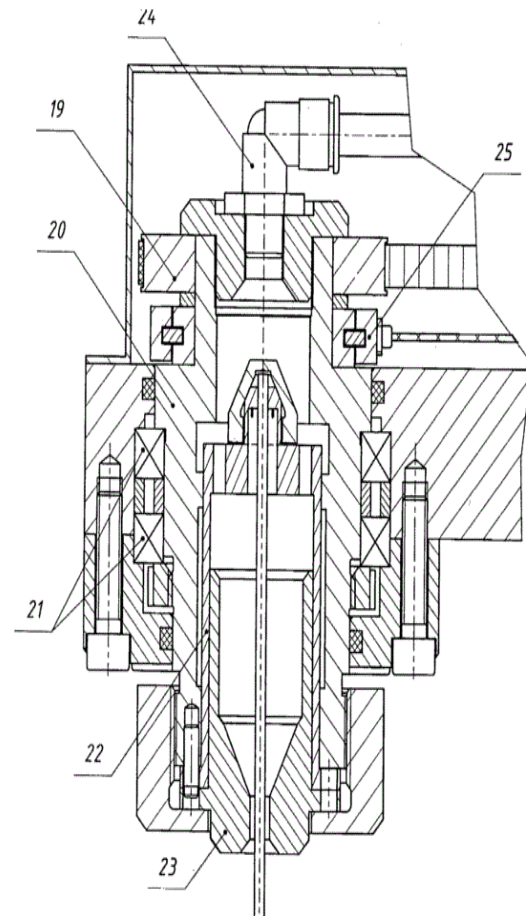


Рис. 7. Верхняя опора электрода-инструмента

Нижняя опора ЭИ (рис. 8) состоит из шкива привода вращения 26, полого шпинделя 27, установленного в корпусе 30 на радиально-упорных подшипниках 28 с керамическими телами качения.

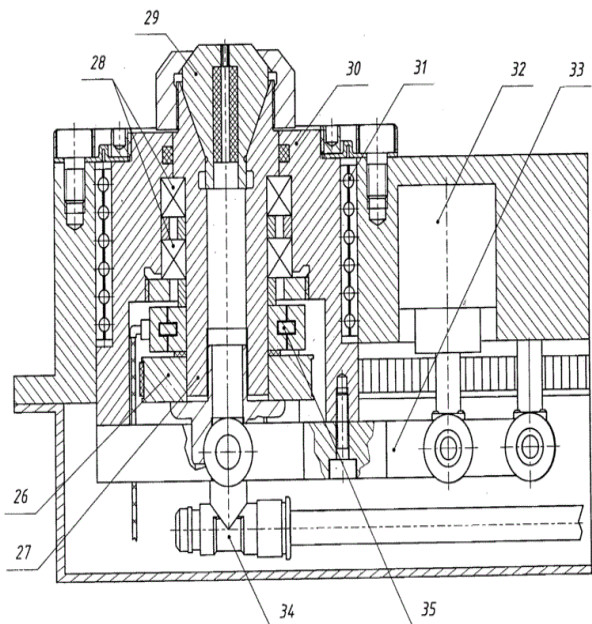


Рис. 8. Нижняя опора электрода-инструмента

Сменный цанговый зажим 29 обеспечивает закрепление ЭИ с требуемой конфигурацией поперечного сечения.

С целью обеспечения необходимого натяжения ЭИ корпус шпиндельного узла 30 выполнен с возможностью осевого перемещения в направляющей шариковой втулке 31. Натяжение осуществляется и контролируется электромеханическим актуатором 32, передающим усилие через рычаг 33. Для защиты от протечки электролита через прорези цангового зажима 29 в полый шпиндель 27 через поворотную муфту 34 подается сжатый воздух. Токосвод к шпинделю нижней опоры ЭИ обеспечивается вращающимся контактным устройством 35.

Станок работает следующим образом. Для электрохимической вырезки замкнутого контура в заготовке обрабатываемого изделия 4 предварительно прошивается технологическое отверстие. Если отверстие в заготовке прошито заранее, то его центр совмещается с точкой пересечения оси опор 6, 7 полурамы 8 и опоры 9 рабочей головки-скобы 10.

Пропущенный сквозь технологическое отверстие и закрепленный в верхней 14 и нижней 15 опорах рабочей головки 10 ЭИ 11 контролируемым относительным поворотом шпинделей 20 и 27 закручивается (при необходимости) на заданный угол. Перемещением корпуса шпиндельного узла 30 актуатором 32 осуществляется его натяжение. После включения синхронизированного вращения шпинделей 20, 27 серводвигателями 16, 17, подачи электролита сквозь сопло 23 с помощью поворотной муфты 24 и подвода технологического тока через контактные кольца 25, 35 программно-управляемым перемещением стола 3 и изменением угла наклона продольной оси ЭИ 11 в двух плоскостях осуществляется процесс вырезки.

Для прошивки отверстий в верхней опоре 14 рабочей головки-скобы 10 закрепляется полый стержневой ЭИ 11. После установки требуемого угла наклона продольной оси ЭИ, включения вращения шпинделя 20, подачи электролита с помощью поворотной муфты 24 и подвода технологического тока через контактное кольцо 25 рабочей подачей верхней подвижной части скобы 10 осуществляется подача рабочего конца ЭИ 11 обрабатываемое изделие 4.

Предлагаемая кинематическая структура, и компоновочное решение станка позволяет, кроме электрохимической вырезки и прошивки отверстий, выполнять обработку глухих пазов и сложных пространственных поверхностей. Процесс может быть осуществлен как построчное электрохимическое фрезерование полым стержневым непрофилированным ЭИ. Для этого кинематика исполнительных движений, используемая при прошивке отверстий, дополняется перемещениями стола 3 и изменениями угла наклона продольной оси стержневого ЭИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты аналитического обзора состояния вопроса по теории, технологии и оборудованию для электрохимической вырезки непрофилированным электродом-инструментом. Рассмотрена оригинальная технологическая схема и компоновка

оборудования для электрохимической многокоординатной вырезки электродом-пластиной с управляемым углом закрутки.

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 проволоочным 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 Tul'skogo 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 NaNO₃ electrolyte // *J. Materials Processing Tech.* 1995. Vol. 55, No. 3–4. Pp. 417-420. [M. A. Bejar, F. Eterovich, "Wire-electrochemical cutting with a NaNO₃ 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. **CNC** – gesteuert elektrochemisch mit unprofilierten Elektroden senken / S. W. Bezrukov, et. al. // *Werkstat und Betrieb*. 1991. Vol. 124, No. 6. Pp. 502-504. [S. W. Bezrukov, et. al., "CNC – gesteuert elektrochemisch mit unprofilierten Elektroden senken", in *Werkstat und Betrieb*, vol. 124, no. 6, pp. 502-504, 1991.]

13. **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.]

14. **Житников В. П., Зайцев А. Н.** Математическое моделирование электрохимической размерной обработки. Уфа: УГАТУ, 1996. 220 с. [V. P. Zhitnikov, A. N. Zaytsev, *Mathematical modeling of electrochemical machining*, (in Russian). Ufa: UGATU, 1996.]

15. **Belogorsky A., Zaitsev A., Zhitnikov V.** Flexible automation ECM technology based on 3-coordinate ECM-machines. Proceed // *International symposium for Electromachining ISEM XI*, (Lausanne, Switzerland, 17-21 April, 1995). P. 585-592. [A. Belogorsky, A. Zaitsev, V. Zhitnikov, "Flexible automation ECM technology based on 3-coordinate ECM-machines. Proceed", in *International symposium for Electromachining ISEM XI*, 1995, pp. 585-592.]

16. **Kozak J.** Electrochemical machining with a nonprofiled electrode // *Proceeding of Intern. symposium for Electromachining ISEM XII*, (Aachen, Germany, May 1998). Pp. 527-531. [J. Kozak, "Electrochemical machining with a non-profiled electrode", in *Proceeding of Intern. symposium for Electromachining ISEM XII*, 1998, pp. 527-531.]

17. **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.]

18. **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.]

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.

БЕЗРУКОВ Сергей Викторович, нач. отд. проектир. силовых импульсн. источн. питания систем НПО «Станкостроение». Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 1977). Разработка источн. питания для электрофизикохим. методов обработки.

КОСАРЕВ Тимофей Владимирович, нач. отдела разработки ПО СУ электрохим. станков НПО «Станкостроение». Дипл. инж. по спец. САПР (УГАТУ, 2000). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2004). Иссл. в обл. систем управления.

METADATA

Title: Technology and equipment for multicoordinate electrochemical cutting.

Authors: A. N. Zaytsev¹, T. R. Idrisov², R. M. Salakhutdinov³, S. V. Bezrukov⁴, T. V. Kosarev⁵

Affiliation:

^{1,3} Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

^{2,4,5} NPO "Stankostroenie" LLC (Sterlitamak), Russia.

Email: ¹znagaev@yandex.ru, ²idrisov.tr@mail.ru, ³salahutdinov.r@yandex.ru, ⁴bezrukov.sv@mail.ru, ⁵tima-kosarev@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 24, no. 2 (88), pp. 20-28, 2020. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: A new method of electrochemical multicoordinate cutting with a wire electrode tool is considered. The flow diagrams of the electrochemical cutting are given. The description of the mechanic system of the machine is presented.

Key words: electrochemical processing with wire electrode tool; ECM machine mechanics; 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).

BEZRUKOV, Sergey Viktorovich, chief of ECM generators development department NPO "Stankostroenie". Dipl. Eng. Electrician (UAI, 1977).

KOSAREV, Timofey Vladimirovich, chief of ECM control systems and software development department NPO "Stankostroenie". Dipl. Eng. on CAD-CAM systems specialty (USATU, 2000). Ph.D. in Tech. Sci. (USATU, 2004).