



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov











Определение скорости электрохимического растворения стали У10А в условиях ЭХРО с неподвижным катодом-инструментом

Василий Янпольский^{1, a, *}, Мария Иванова^{1, b}, Александра Насонова^{1, c}, Александр Янюшкин^{2, d}

¹Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

²Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, пр-т Московский, 15, г. Чебоксары, Чувашская Республика, 428015, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-7728-7623>,  yanpolskiy@corp.nstu.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-2449-8638>,  ivanova777888@yandex.ru;

^c  <https://orcid.org/0009-0006-0194-8831>,  a.nasonova@corp.nstu.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>,  yanyushkinas@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.047.4

История статьи:

Поступила: 15 декабря 2023

Рецензирование: 03 апреля 2024

Принята к печати: 06 мая 2024

Доступно онлайн: 15 июня 2024

Ключевые слова:

Скорость электрохимического растворения

Инструментальная сталь

Выход по току

Производительность

Неподвижный катод-инструмент

Обработка отверстий

АННОТАЦИЯ

Введение. В заготовительном производстве при замене твердых сплавов на инструментальные стали возникают трудности при формообразовании поверхностей с обеспечением требуемых параметров производительности, качества и точности вследствие наличия неполной информации для назначения режимов электрохимической обработки указанного класса материалов. Этот факт требует проведения дополнительных исследований, позволяющих определить рациональные режимы обработки, которые обеспечивают необходимые технологические параметры (производительность, точность размеров и шероховатость поверхности). **Цель работы:** проведение исследований по установлению закономерностей электрохимического формообразования инструментальных сталей и определению режимов процесса формообразования. **В работе исследованы** особенности анодного растворения инструментальной стали У10А в водном растворе NaCl 10%-й концентрации. Диапазон изменения потенциалов составлял от 0 до 8 В. Определены технологические параметры производительности (выход по току для основной реакции и скорость электрохимического растворения при напряжении 8 В и давлении электролита 0,1 МПа). **Методы исследования.** Для поляризационных исследований выбран потенциодинамический метод исследования. Технологические эксперименты осуществлялись по схеме прошивки отверстий с неподвижным катодом-инструментом из нержавеющей стали без изоляции. В качестве катода-инструмента была выбрана игла круглого сечения с наружным диаметром 0,908 мм и внутренним 0,603 мм. **Результаты и обсуждения.** В результате проведенных исследований выявлено, что электрохимическое растворение инструментальной стали У10А в 10%-м водном растворе NaCl имеет активный характер в исследуемом диапазоне потенциалов от 0 до 8 В. Проведенные технологические эксперименты позволили установить размеры получаемых отверстий – средний диаметр 1,433 мм и глубину 0,574 мм. Выход по току составил 70,83 %. На основе анализа полученных экспериментальных данных установлено, что для обеспечения высокой производительности процесса электрохимического формообразования стали У10А в растворе 10%-го NaCl подача катода-инструмента должна составлять 0,2232 мм/мин, что соответствует скорости электрохимического растворения при исследуемых условиях формообразования.

Для цитирования: Определение скорости электрохимического растворения стали У10А в условиях ЭХРО с неподвижным катодом-инструментом / В.В. Янпольский, М.В. Иванова, А.А. Насонова, А.С. Янюшкин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 95–106. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-95-106.

Введение

Себестоимость готового изделия складывается из стоимости исходной заготовки и ее механической обработки, а также других расходов. В настоящее время с целью наиболее рационального использования материальных ресурсов в практике машиностроения заменяют дорогостоящие

и труднообрабатываемые сплавы на более экономичную альтернативу [1–5]. Таким образом, эффективное использование ресурсов позволяет повысить экономическую прибыль предприятия и уровень популяризации практического применения принципов бережливого производства [6–11]. В условиях ограничения сырья и постоянного роста стоимости транспортной логистики, энергии и других сопутствующих расходов в производственной системе хозяйственных работ проблема экономии материальных ресурсов становится все более актуальной.

*Адрес для переписки

Иванова Мария Валерьевна, ст. преподаватель
Новосибирский государственный технический университет,
пр. К. Маркса, 20,
630073, г. Новосибирск, Россия
Тел.: 8 (383) 346-17-97, e-mail: ivanova777888@yandex.ru

Типичным примером подобной практики является замена твердых сплавов на инструментальные стали. Чаще всего прикладной характер распространяется на заготовительное производство, которое включает в себя применение изделий с высокими показателями точности и качества поверхности (матрицы, пуансоны и др.). Вместе с тем при замене твердых сплавов на инструментальные стали возникают некоторые особенности как при эксплуатации изделий, так и при их изготовлении. В частности, прямой перенос режимов обработки твердосплавных матриц на инструментальные стали не обеспечивает требуемых параметров производительности, точности и качества. Для обработки твердосплавных матриц, как правило, применяются методы, основанные на электрохимическом и механическом воздействии [12–15]. В работах [16–23] описаны особенности применения электрохимической размерной обработки (ЭХРО) для сталей Р6М5, ХВГ и др. В работах [12, 14, 16–19, 23] указано, что точность ЭХРО определяется погрешностями изготовления катода-инструмента, установки заготовки, температурой рабочей среды, скоростью течения электролита, неравномерностью движения электрода и др. Однако данных для формообразования инструментальной стали У10А нет.

Применение методов, основанных на электрохимическом формообразовании, для изделий из инструментальных сталей требует дополнительных исследований, которые позволят определить рациональные режимы обработки, обеспечивающие требуемую производительность, точность и параметры качества.

Таким образом, *целью данной работы* является проведение исследований по установлению закономерностей электрохимического формообразования инструментальных сталей (поляризационные исследования) и определению режимов процесса электрохимической обработки (технологический эксперимент).

Работа актуальна и имеет практическое значение для заготовительного производства.

Методика исследований

Подготовка образцов

Материалом для исследований выбрана распространенная в заготовительном производстве инструментальная сталь У10А. Образцы для проведения поляризационных исследований изготавливались посредством электроэрозионного вырезания параллелепипедов размерами 0,66×0,80×20,00 мм. Рабочая поверхность образца для поляризационных исследований представлена на рис. 1.

Для локализации процесса растворения и оценки токовых параметров боковые поверхности образцов изолировались по схеме, представленной на рис. 2. Образец 1 посредством пайки присоединялся к контактному проводу 2 и помещался в диэлектрическую оправку 3 с последующей заливкой эпоксидной смолой с отвердителем 4.

Образец для проведения технологических экспериментов представлял собой параллелепипед модельного материала, размеры которого составляли 50×50×50 мм.

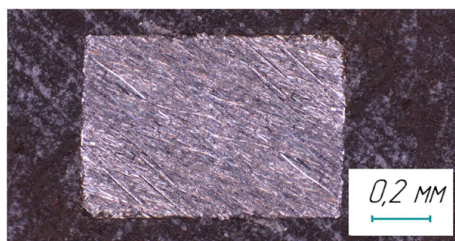


Рис. 1. Внешний вид рабочей поверхности образца для поляризационных исследований

Fig. 1. Appearance of the specimen working surface for polarization studies

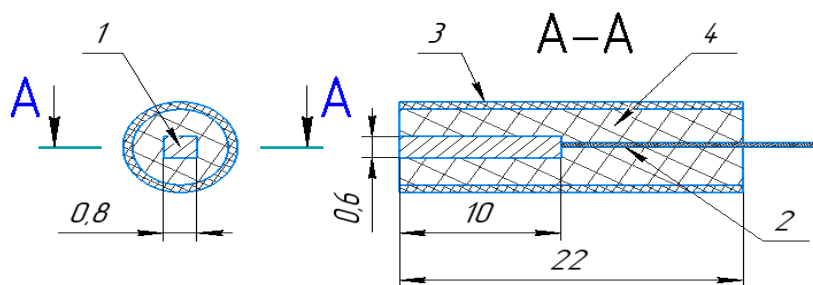


Рис. 2. Образец для поляризационных исследований

1 – образец; 2 – контактный провод; 3 – диэлектрическая оправка;
4 – эпоксидная смола с отвердителем

Fig. 2. Specimen for polarization studies:

1 – specimen; 2 – contact wire; 3 – dielectric mandrel; 4 – epoxy resin with hardener

Поляризационные исследования

Исследование особенностей анодного растворения стали У10А проводили с помощью потенциодинамического метода [24–29] и определяли зависимости плотности тока от потенциала анода в диапазоне от 0 до 8 В.

Поляризационные исследования проводились на экспериментальной установке, схема и внешний вид которой приведены на рис. 3. Установка состоит из трехэлектродной электрохимической ячейки 1, потенциостата-гальваностата Elins P-20X 2 и ПК 3 для измерения, реги-

страции и обработки данных. В качестве катода использовали медное кольцо со следующими размерами: шириной 10 мм, наружным и внутренним радиусами 35 и 31 мм соответственно.

Скорость развертки составила 1000 мВ/с с шагом 0,011 мВ. Величина зазора между анодом и платиновым электродом сравнения равнялась 0,1 мм. После каждого эксперимента поверхность исследуемого образца зачищалась абразивной бумагой с зернистостью 20–28 мкм (Р600). Рабочей средой при электрохимической обработке изделий служит токопроводящий раствор электролита. В практике электрохимической обработки наиболее применяемым является раствор нейтральной соли хлористого натрия (NaCl) в воде [17–20, 27–29]. Концентрация электролита 10 % выбрана согласно источникам [29–33]. Кинематическая вязкость ν электролита составила $1,11 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ [30].

Схемы получения отверстий методом ЭХРО

Для формообразования глубоких отверстий рассматривались следующие схемы [32], представленные на рис. 4.

Для исследований была выбрана схема с катодом-инструментом без изоляции, у которого подача равна нулю, что позволяет определить технологические параметры производительности – выход по току для основной реакции и скорость электрохимического растворения в выбранных исходных условиях. Особенности, возникающие при определении выхода по току, приведены в работе Я.М. Колотырина и Г.М. Флорианович [34]. Расчет выхода по току осуществ-

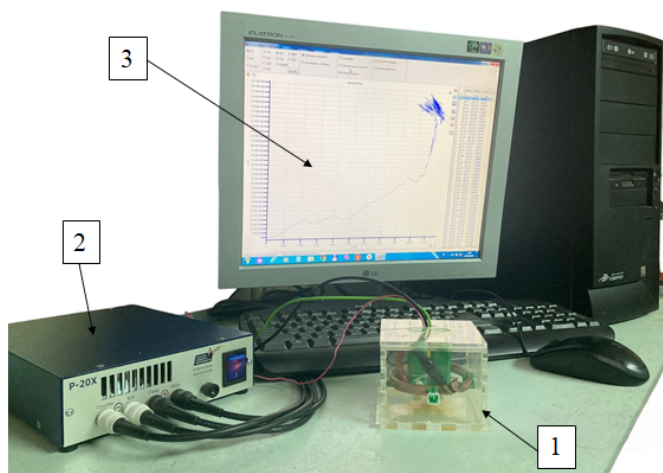


Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки для потенциодинамических исследований:

1 – трехэлектродная электрохимическая ячейка;
2 – потенциостат-гальваностат Elins P-20X; 3 – ПК

Fig. 3. Scheme and appearance of the experimental setup for potentiodynamic studies:

1 – three-electrode electrochemical cell; 2 – potentiostat-galvanostat Elins P-20X; 3 – PC

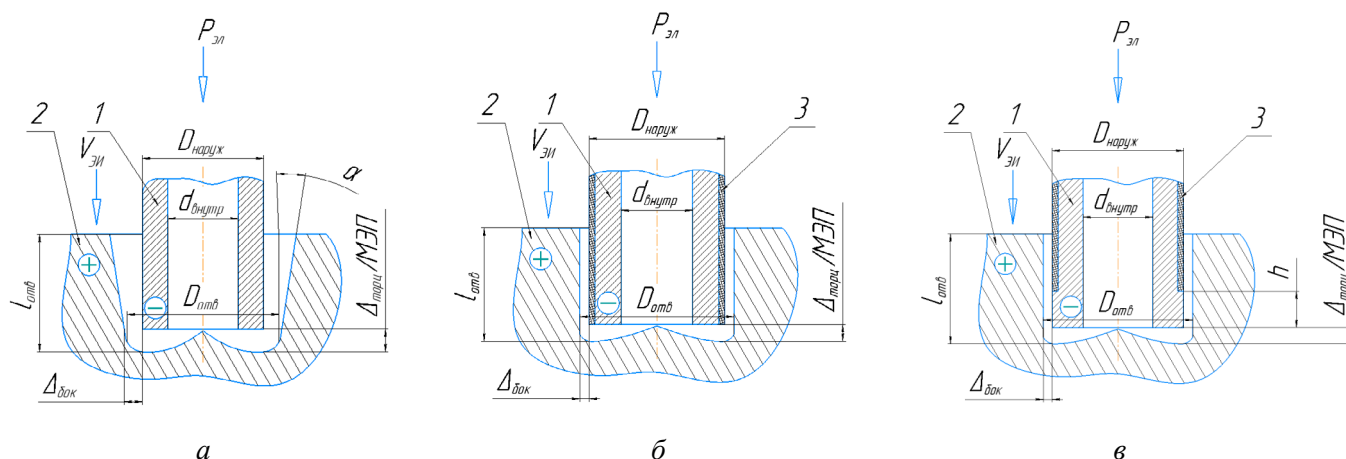


Рис. 4. Схемы формообразования отверстия:

а – с катодом-инструментом без изоляции; б – с изолированным катодом-инструментом; в – с изолированным катодом-инструментом с рабочим пояском (буртиком); 1 – катод; 2 – анод; 3 – изоляционный слой

Fig. 4. Hole shaping schemes:

а – with a cathode-tool without insulation; б – with an insulated cathode-tool; в – with an insulated cathode-tool with a working belt (shoulder); 1 – cathode; 2 – anode; 3 – insulating layer

влялся по методике, представленной в работах [29, 31–34].

При расчете допускается, что изменение температуры электролита и его нагрев в процессе электролиза незначителен и не учитывается, а ось катода совпадает с осью полученного отверстия.

В качестве катода-инструмента применялись полые иглы круглого сечения из нержавеющей стали с наружным и внутренним диаметрами 0,908 и 0,603 мм соответственно. При этом площадь выходного отверстия составила $0,362 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Внешний вид катода-инструмента и оснастки представлен на рис. 5.

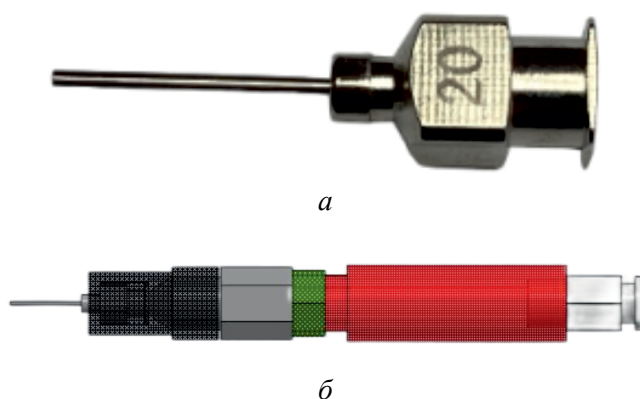


Рис. 5. Внешний вид:

а – катода-инструмента; б – инструментальной оснастки на катод-инструмент

Fig. 5. Appearance of:

а – the cathode tool; б – tooling for cathode tool

Экспериментальная установка для проведения электрохимической обработки отверстий представлена на рис. 6, она состоит из следую-

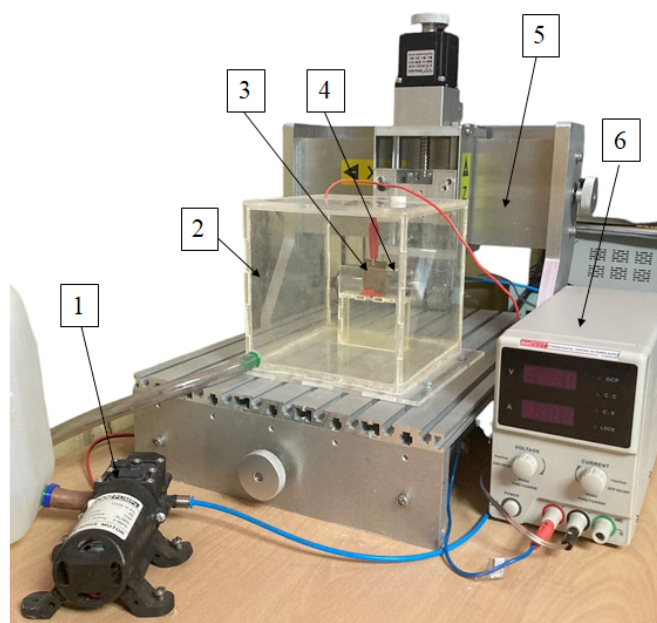


Рис. 6. Экспериментальная установка для электрохимической обработки отверстий:

1 – система подачи электролита; 2 – электрохимическая ячейка; 3 – анод (заготовка); 4 – катод-инструмент; 5 – трехкоординатный станок; 6 – технологический источник питания

Fig. 6. Experimental setup for electrochemical hole machining:

1 – electrolyte supply system; 2 – electrochemical cell; 3 – anode (blank); 4 – cathode-tool; 5 – three-coordinate machine; 6 – technological power source

щих элементов: системы подачи электролита 1, электрохимической ячейки 2 с анодом 3 и катодом-инструментом 4, трехкоординатного станка 5 и технологического источника тока 6.

Для реализации электрохимической обработки необходимо учитывать, что подача электролита в зону между электродами должна осуществляться равномерно, тем самым обеспечивается стабильность процесса электрохимического растворения заготовки. Скорость течения электролита и скорость протекания электрохимических процессов зависит от давления в системе и гидравлических потерь. В работах [16, 23, 28–30] описано влияние гидродинамических параметров на производительность анодного растворения. При проведении экспериментальных исследований давление в системе нагнеталось мембранным насосом и составляло 0,9 МПа. К системе подачи электролита 1 помимо насоса относятся блок питания для насоса, шланги и емкости для подачи и слива электролита.

Величина зазора между анодом и катодом при проведении технологического эксперимента составляла 0,1 мм [29, 31–34].

После проведения эксперимента образец помещался в ультразвуковую ванну для очистки от шлама и потом только взвешивался на высокоточных весах для лабораторий (ц.д. 0,1 мг). Глубины отверстий измерялись индикатором цифровым ИЧЦ-10 (0–12,7 мм, ц.д. 0,001 мм). Фотографии образца выполнялись на микроскопе Nikon MM-400 с увеличением в 30 раз.

Результаты и их обсуждение

В результате поляризационных исследований были установлены особенности анодного растворения инструментальной стали У10А (рис. 7). Характер кривой анодного поведения исследуемой стали в 10%-м растворе нейтральной соли NaCl в воде показывает, что активное растворение стали происходит в диапазоне потенциалов $\varphi = 0,3...8,0$ В с незначительным торможением в области потенциалов $\varphi = 2,1...2,6$ В и $\varphi = 3,9...4,3$ В. Вероятно, это связано с явлениями, которые происходят в процессе электролиза стали в водном растворе соли, такими как окисление исследуемого материала и процесс разложения воды [28–30, 31–33]. Общий характер электрохимического растворения стали У10А в 10%-м водном растворе NaCl свидетель-

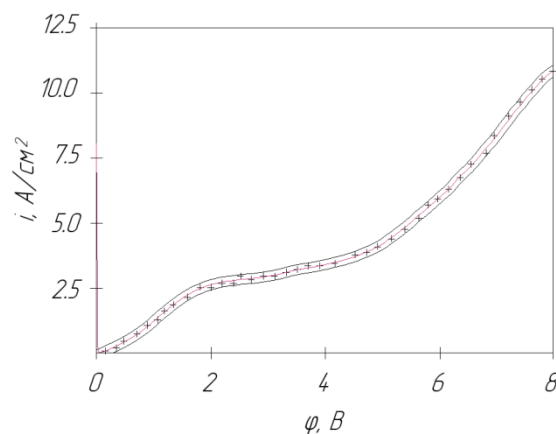


Рис. 7. Анодная поляризационная кривая инструментальной стали У10А в 10%-м водном растворе NaCl

Fig. 7. Anodic polarization curve of U10A tool steel in 10 % aqueous NaCl solution

ствует об отсутствии участков пассивации. Это связано с тем, что при электрохимическом растворении материалов в хлористом натрии пассивационные явления снимаются за счет увеличения напряжения без внесения дополнительных активирующих процессов [28–34].

Таким образом, растворение инструментальной стали У10А в 10%-м водном растворе NaCl имеет активный характер в диапазоне потенциалов $\varphi = 0,3...2,1$ В, $\varphi = 2,7...3,8$ В и $\varphi = 4,4...8,0$ В. Для определения выходных технологических параметров производительности, а именно выхода по току для основной реакции и скорости электрохимического растворения, было выбрано напряжение 8 В.

Для расчета выхода по току по формуле [29] вычислялись необходимые величины.

С целью определения объема удаленного металла были проведены экспериментальные исследования, позволившие получить в условиях электрохимического растворения стали У10А значения массы растворенного материала. Из рис. 8 видно, что среднее значение тока при межэлектродном зазоре 0,1 мм в начальный момент времени составило 0,099 А. Продолжительность эксперимента, равная 7 минутам, обусловлена стабилизацией величины тока, т. е. межэлектродный зазор увеличился на предельно допустимое значение при заданных исходных параметрах.

Для определения массы растворенного материала была проведена серия экспериментов при постоянном токе 0,099 А и начальном межэлектродном промежутке (МЭП) 0,1 мм.

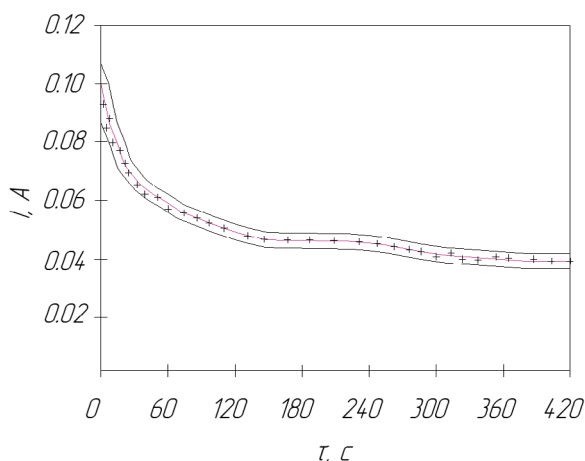


Рис. 8. График зависимости тока от времени при постоянном напряжении

Fig. 8. Graph of current versus time at constant voltage

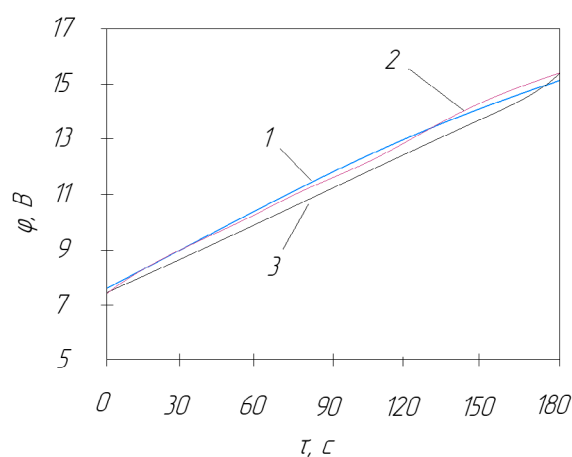


Рис. 9. График зависимости напряжения от времени при постоянном токе 0,099 А

Fig. 9. Graph of voltage versus time at a constant current of 0.099 A

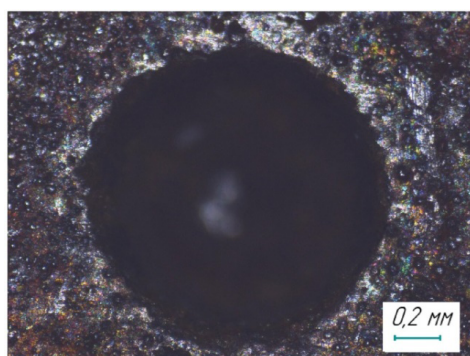
На рис. 9 приведен график зависимости напряжения от времени для серии экспериментов в течение 3 минут.

В результате взвешивания были получены следующие массы $m_{\text{практ}}$: для эксперимента № 1 – 0,0054 г; для эксперимента № 2 – 0,0047 г; для эксперимента № 3 – 0,0053 г. Таким образом, среднеарифметическая масса равна $0,0051 \pm 0,0009$ г.

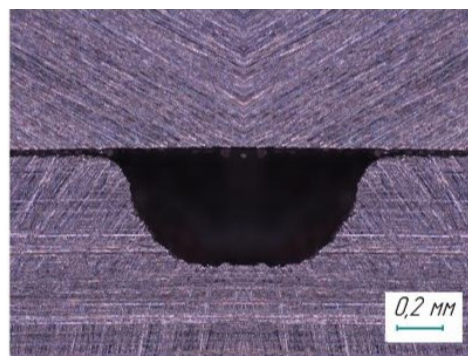
На рис. 10 приведены фотографии полученного отверстия и его профиль. Необходимо отметить, что образование конусности является характерным для обработки неподвижным катод-инструментом.

На рис. 11 представлены размеры отверстия по сечениям, измеренные с шагом 0,027 мм; диаметр отверстия с фаской равен 1,433 мм, диаметр дна отверстия равен 0,389 мм, глубина отверстия $h_{\text{ср}}$ составила 0,574 мм.

Для расчета электрохимического эквивалента стали У10А необходимо учитывать массовую долю по основным элементам, относящимся к металлам, – железу (98,47 %) и марганцу (0,23 %) [35]. Химический состав по плавочному анализу взят из нормативно-технического документа [32]. В таблице представлены весовой и объемный электрохимические эквиваленты стали У10А.



а



б

Рис. 10. Отверстие в 10%-м растворе NaCl при неподвижном катод-инструменте круглого сечения с наружным и внутренним диаметрами 0,908 мм и 0,603 мм при длительности 7 минут:

а – вид сверху; б – профиль

Fig. 10. A hole in 10 % NaCl with a stationary cathode-tool of circular cross-section with outer and inner diameters of 0.908 mm and 0.603 mm with a duration of 7 minutes:

а – top view; б – profile

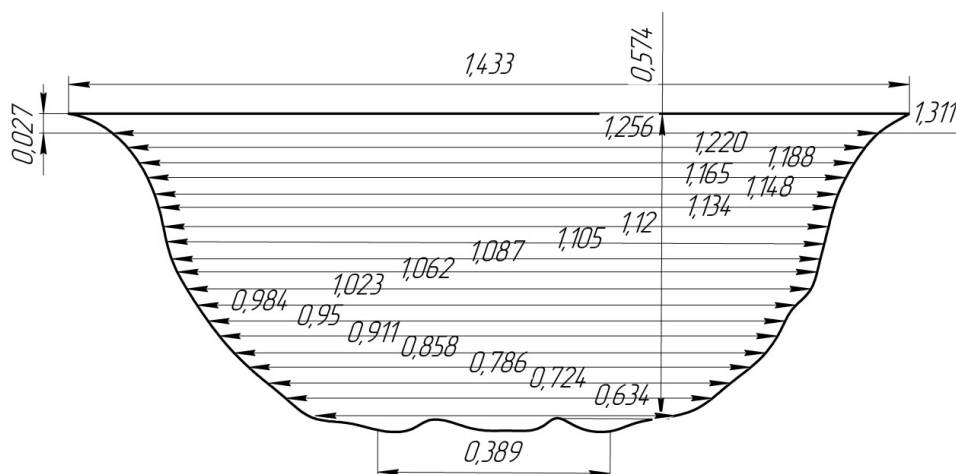


Рис. 11. Размеры отверстия в стали У10А при электрохимическом растворении в 10%-м растворе NaCl с неподвижным катодом-инструментом круглого сечения с наружным и внутренним диаметрами 0,908 мм и 0,603 мм при длительности 3 минуты

Fig. 11. Hole dimensions in 10 % NaCl with a stationary cathode-tool of circular cross-section with outer and inner diameters of 0.908 mm and 0.603 mm for a duration of 3 minutes

Электрохимические эквиваленты инструментальной стали У10А

Electrochemical equivalents of U10A tool steel

Элемент / Element	Электрохимический эквивалент / Electrochemical equivalent	
	$\varepsilon_m, \text{ г/А} \cdot \text{мин} /$ $\varepsilon_m, \text{ g/A} \cdot \text{min}$	$\varepsilon_v, \text{ см}^3/\text{А} \cdot \text{мин} /$ $\varepsilon_v, \text{ cm}^3/\text{A} \cdot \text{min}$
Fe	0,01736	2,22279
Mn	0,01708	2,18693
У10А / U10A	0,01759	2,25198

На основе расчетов по формуле, представленной в работе [29], выход по току равен 70,83 %, или 0,708. Если коэффициент выхода металла по току η находится в диапазоне от 0,5 до 1,0, то это значит, что анод активно растворяется при электролизе [29, 31–33]. Этот факт согласуется с данными, полученными на основе поляризационных исследований электрохимического растворения стали У10А в 10%-м водном растворе NaCl.

Произведенные эксперименты и расчеты выхода по току позволили оценить производительность процесса электрохимической обработки стали У10А в выбранном составе электролита.

В схеме обработки при неподвижном катоде размер межэлектродного промежутка в начале процесса соответствует установленному торцевому зазору, а при завершении обработки зна-

чение МЭП увеличивается на величину, равную технологическому припуску z . С увеличением значения МЭП уменьшается скорость электрохимического растворения и производительность обработки. Ниже представленная формула [31–32] справедлива при условии, что значение выхода по току не изменяется с колебанием величины плотности тока:

$$\vartheta_{\text{э.х.р}} = \frac{\varepsilon_v U \theta \eta}{\sqrt{\Delta_{\text{торц}}^2 + (\varepsilon_v U \theta \eta \tau)}} \text{ мм/мин},$$

где ε_v – объемный электрохимический эквивалент стали У10А, $\text{см}^3/\text{А} \cdot \text{мин}$ (0,00225198 $\text{см}^3/\text{А} \cdot \text{мин}$); U – напряжение на электродах, В (8 В); θ – удельная электропроводность электролита, $\text{см} \cdot \text{м}^{-1}$, (12,11 $\text{см} \cdot \text{м}^{-1}$) [31–32]; η – коэффициент выхода по току; $\Delta_{\text{торц}}$ – МЭП в начале обработки или

торцевой зазор, мм (0,1 мм); τ – время обработки или время электролиза, мин (3 мин).

Тогда скорость электрохимического растворения в конце третьей минуты равна 0,2232 мм/мин. Для поддержания данной скорости электрохимического растворения необходимо, чтобы МЭП и другие влияющие на производительность процесса параметры были неизменными. Глубина отверстия при ЭХРО за 3 минуты в 10%-м растворе NaCl в схеме при неподвижном катоде-инструменте составила 0,574 мм.

Закключение

В результате выполнения работы установлено, что электрохимическое растворение инструментальной стали У10А в 10%-м водном растворе NaCl происходит активно в течение всего исследуемого диапазона потенциалов. Наибольшая плотность тока наблюдается при потенциале $\varphi = 8$ В.

В условиях электрохимического формообразования отверстия в инструментальной стали У10А в 10%-м водном растворе NaCl с неподвижным полым катодом-инструментом круглого сечения с наружным и внутренним диаметрами 0,908 и 0,603 мм соответственно (площадь выходного отверстия равна $0,362 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$) выход по току составил 70,83 %.

Полученные экспериментальные данные позволили определить главный параметр режима ЭХРО – скорость электрохимического растворения стали У10А при 8 В и давлении 0,1 МПа в 10%-м водном растворе NaCl для условий электрохимического формообразования полым катодом-инструментом, которая равна 0,2232 мм/мин. Проведенные исследования позволили сформировать рекомендации по назначению подачи катода-инструмента, обеспечивающей максимальную скорость электрохимического растворения стали У10А в 10%-м водном растворе NaCl.

Список литературы

1. Дубровина Н.А., Ротман Е.Г. Основные факторы экономии ресурсов на предприятиях машиностроения // Вестник Самарского государственного университета. Серия: Экономика и управление. – 2012. – № 10. – С. 20–26.
2. Emelyanova D.S., Kolesnichenko-Ianushev S.L., Tokarev M.A. Organizational and economic problems of applying quality management systems at engineering companies // Научно-технические ведомости

СПбГПУ. Экономические науки. – 2019. – Т. 12, № 2. – С. 92–102. – DOI: 10.18721/JE.12209.

3. Авдеев С.В., Золкин А.Л., Подолько П.М. Анализ стратегических трендов развития промышленности // Экономика и предпринимательство. – 2023. – № 9. – С. 455–458. – DOI: 10.34925/EIP.2023.158.09.083.

4. Белорусова Н.Л., Студеникина С.П. Влияние нормирования на эффективность использования материальных ресурсов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D, Экономические и юридические науки. – 2019. – № 5. – С. 32–35.

5. Mrugalska B., Ahmed J. Organizational agility in industry 4.0: a systematic literature review // Sustainability. – 2021. – Vol. 13. – P. 1–23. – DOI: 10.3390/su13158272.

6. Пименова Е.М., Арутюнян А.А. Бережливое производство как один из способов повышения экономической безопасности предприятия // Креативная экономика. – 2023. – Т. 17, № 11. – С. 4141–4152. – DOI: 10.18334/ce.17.11.119405.

7. Fernandes M., Correia D., Teixeira L. Lean maintenance practices in the improvement of information management processes: a study in the Facility Management division // Procedia Computer Science. – 2024. – Vol. 232. – P. 2269–2278. – DOI: 10.1016/j.procs.2024.02.046.

8. Lean Engineering – Identifying waste in engineering chains / S. Karch, A. Lüder, C. Listl, N.S. Nowacki, K. Hassan, R. Werner, T. Hohmann, S. Müller // Procedia CIRP. – 2023. – Vol. 120. – P. 463–468. – DOI: 10.1016/j.procir.2023.09.020.

9. Suetina T.A., Odinokov M.Y., Safina D.M. Benefits of project management at lean manufacturing tools implementation // Asian Social Science. – 2014. – Vol. 10 (20). – P. 62–66. – DOI: 10.5539/ass.v10n20p62.

10. Sundararajan N., Terkar R. Improving productivity in fastener manufacturing through the application of Lean-Kaizen principles // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 62 (2). – P. 1169–1178. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.350.

11. Botti L., Mora C., Regattieri A. Integrating ergonomics and lean manufacturing principles in a hybrid assembly line // Computers & Industrial Engineering. – 2017. – Vol. 111. – P. 481–491. – DOI: 10.1016/j.cie.2017.05.011.

12. Электрохимическая обработка безвольфрамовых твердых сплавов / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, В.В. Янпольский, Д.Б. Красильников // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 3 (48). – С. 3–7.

13. Suppression of diamond tool wear in machining of tungsten carbide by combining ultrasonic vibration and electrochemical processing / X. Zhang, R. Huang, K. Liu, A.S. Kumar, H. Deng // Ceramics International. – 2018. – Vol. 44. – P. 4142–4153. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.11.215.



14. Katiyar P.K., Randhawa N.S. A comprehensive review on recycling methods for cemented tungsten carbide scraps highlighting the electrochemical techniques // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2020. – Vol. 90. – P. 105251. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2020.105251.
15. Denkena B., Krödel A., Lang R. Fabrication and use of Cu-Cr-diamond composites for the application in deep feed grinding of tungsten carbide // *Diamond and Related Materials*. – 2021. – Vol. 120. – P. 108668. – DOI: 10.1016/j.diamond.2021.108668.
16. Рахимьянов Х.М., Янпольский В.В., Юсупов А.С. Струйная электрохимическая обработка стали 110Г13Л // *Системы. Методы. Технологии*. – 2016. – № 2 (30). – С. 34–38. – DOI: 10.18324/2077-5415-2016-2-34-38.
17. Electrochemical micro drilling of stainless steel with tool electrode jump motion / Z. Liu, Z.J. Qiu, C. Heng, N.S. Qu // *Materials Science Forum*. – 2009. – Vol. 626–627. – P. 333–338. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.626-627.333.
18. Anasane S.A., Bhattacharyya B. Experimental investigation on suitability of electrolytes for electrochemical micromachining of titanium // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 86. – P. 2147–2160. – DOI: 10.1007/s00170-015-8309-2.
19. Singh R.P., Trehan R. Electrochemical machining and allied processes: a comprehensive review // *Journal of Solid State Electrochemistry*. – 2023. – Vol. 27. – P. 3189–3256. – DOI: 10.1007/s10008-023-05610-x.
20. Deep micro-hole fabrication in EMM on stainless steel using disk micro-tool assisted by ultrasonic vibration / M. Wang, Y. Zhang, Z. He, W. Peng // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2016. – Vol. 229. – P. 475–483. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.10.004.
21. Electrochemical machining of burn-resistant Ti40 alloy / Z. Xu, J. Liu, D. Zhu, N. Qu, X. Wu, X. Chen // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2023. – Vol. 28. – P. 1263–1272. – DOI: 10.1016/j.cja.2015.05.007.
22. Electrochemical dissolution behavior of stainless steels with different metallographic phases and its effects on micro electrochemical machining performance / G. Liu, Z. Gong, Y. Yang, J. Shi, Y. Liu, X. Dou, C. Li // *Electrochemistry Communications*. – 2024. – Vol. 160. – P. 1–13. – DOI: 10.1016/j.elecom.2024.107677.
23. Process control in jet electrochemical machining of stainless steel through inline metrology of current density / M.Y. Zanjani, M. Hackert-Oschätzchen, A. Martin, G. Meichsner, J. Edelmann, A. Schubert // *Micromachines*. – 2019. – Vol. 10. – P. 245–272. – DOI: 10.3390/mi10040261.
24. Puchkov Yu.A., Poklad V.A., Shkretov Yu.P. A study of coatings on high-temperature nickel alloys by the potentiodynamic method // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2005. – Vol. 47. – P. 239–243. – DOI: 10.1007/s11041-005-0059-6.
25. Wang M.H., Liu W., Peng W. Multiphysics research in electrochemical machining of internal spiral hole // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 74. – P. 749–756. – DOI: 10.1007/s00170-014-5938-9.
26. Evans K.J., Rebak R.B. Repassivation potential of alloy 22 in chloride plus nitrate solutions using the potentiodynamic-galvanostatic-potentiostatic method // *Materials Research Society Symposia Proceedings*. – 2006. – Vol. 985. – P. 1–7. – DOI: 10.1557/PROC-985-0985-NN03-13.
27. Davydov A.D., Volgin V.M., Lyubimov V.V. Electrochemical machining of metals: Fundamentals of electrochemical shaping // *Russian Journal of Electrochemistry*. – 2004. – Vol. 40. – P. 1230–1265. – DOI: 10.1007/s11175-005-0045-8.
28. Фрейман Л.И., Макаров В.А., Брыскин И.Е. Потенциостатические методы в коррозионных исследованиях и электрохимической защите / под ред. Я.М. Колотыркина. – Л.: Химия, 1972. – 240 с.
29. Седыкин Ф.В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин. – М.: Машиностроение, 1976. – 302 с.
30. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / под общ. ред. В.А. Волосатова. – Л.: Машиностроение, 1988. – 719 с. – ISBN 5-217-00267-0.
31. Байсунов И.А., Волосатов В.А. Справочник молодого рабочего по электрохимической обработке. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1990. – 176 с. – ISBN 5-06-000932-7.
32. Байсунов И.А. Электрохимическая обработка металлов. – М.: Машиностроение, 1981. – 220 с.
33. Подураев В.Н., Камалов В.С. Физико-химические методы обработки. – М.: Машиностроение, 1973. – 346 с.
34. Колотырин Я.М., Флорианович Г.М. Аномальные явления при растворении металлов // *Итоги науки. Электрохимия*. – 1971. – № 7. – С. 5–64.
35. ГОСТ 1435–99. Прутки, полосы и мотки из инструментальной негелированной стали. Общие технические условия. – Минск: Изд-во стандартов, 1999. – 23 с.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.





© 2024 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).





Determination of the rate of electrochemical dissolution of U10A steel under ECM conditions with a stationary cathode-tool

Vasily Yanpolskiy ^{1, a, *}, Maria Ivanova ^{1, b}, Alexandra Nasonova ^{1, c}, Alexander Yanyushkin ^{2, d}

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² I.N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-7728-7623>,  yanpolskiy@corp.nstu.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-2449-8638>,  ivanova777888@yandex.ru;

^c  <https://orcid.org/0009-0006-0194-8831>,  a.nasonova@corp.nstu.ru; ^d  <https://orcid.org/0000-0003-1969-7840>,  yanyushkinas@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15 December 2023

Revised: 03 April 2024

Accepted: 06 May 2024

Available online: 15 June 2024

Keywords:

Electrochemical dissolution rate

Tool steel

Current output

Performance

Stationary cathode tool

Hole machining

ABSTRACT

Introduction. In blank production, when replacing hard alloys with tool steels, difficulties arise in shaping surfaces to ensure the required parameters of productivity, quality and accuracy, due to the presence of incomplete information for assigning electrochemical processing modes for this class of materials. This fact requires additional research to determine rational processing modes that provide the necessary technological parameters (productivity, dimensional accuracy and surface roughness). **The purpose of the work** is to conduct research to establish the patterns of electrochemical shaping of tool steels and determine the modes of the shaping process. **The work investigated** the features of anodic dissolution of U10A tool steel in an aqueous NaCl solution of 10 % concentration. The range of potential changes was from 0 to 8 V. Technological performance parameters were determined (current output for the main reaction and the rate of electrochemical dissolution at a voltage of 8 V and an electrolyte pressure of 0.1 MPa). **Research methods.** For polarization studies, a potentiodynamic research method was chosen. Technological experiments were carried out using the model of piercing holes with a stationary cathode-tool made of stainless steel without insulation. A circular cross-section with outer diameters of 0.908 mm and inner diameters of 0.603 mm was chosen as a cathode tool. **Results and discussions:** it is revealed that the electrochemical dissolution of U10A tool steel in a 10 % aqueous solution of NaCl is active in the studied potential range from 0 to 8 V. The technological experiments carried out made it possible to establish the dimensions of the resulting holes — an average diameter of 1.433 mm and a depth of 0.574 mm. The current efficiency was 70.83 %. Based on the analysis of the experimental data obtained, it is established that in order to ensure high productivity of the process of electrochemical forming of U10A steel in a solution of 10 % NaCl, the feed of the cathode tool should be 0.2232 mm/min, which corresponds to the rate of electrochemical dissolution under the studied forming conditions.

For citation: Yanpolskiy V.V., Ivanova M.V., Nasonova A.A., Yanyushkin A.S. Determination of the rate of electrochemical dissolution of U10A steel under ECM conditions with a stationary cathode-tool. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 2, pp. 95–106. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.2-95-106. (In Russian).

References

1. Dubrovina N.A., Rotman E.G. Osnovnye faktory ekonomii resursov na predpriyatiyakh mashinostroeniya [The basic factors of resource saving on the enterprises of mechanical engineering]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika i upravlenie = Vestnik of Samara State University. Series: Economics and Management*, 2012, no. 10, pp. 20–26.
2. Emelyanova D.S., Kolesnichenko-Ianushev S.L., Tokarev M.A. Organizational and economic problems of applying quality management systems at engineering companies. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskie nauki = St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*, 2019, vol. 12, no. 2, pp. 92–102. DOI: 10.18721/JE.12209.

* Corresponding author

Ivanova Maria V., Senior Lecturer

Novosibirsk State Technical University,

20 Prospekt K. Marksa,

630073, Novosibirsk, Russian Federation

Tel.: +7 383 346-11-71, e-mail: ivanova777888@yandex.ru

3. Avdeev S.V., Zolkin A.L., Podolko P.M. Analiz strategicheskikh trendov razvitiya promyshlennosti [Analysis of strategic trends in industrial development]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo = Journal of Economy and entrepreneurship*, 2023, no. 9, pp. 455–458. DOI: 10.34925/EIP.2023.158.09.083.
4. Belorusova N., Studenikina S. Vliyanie normirovaniya na effektivnost' ispol'zovaniya material'nykh resursov [The effect of normalization on the efficiency of using material resources]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya D, Ekonomicheskie i yuridicheskie nauki = Vestnik of Polotsk State University. Part D. Economic and legal sciences*, 2019, no. 5, pp. 32–35.
5. Mrugalska B., Ahmed J. Organizational agility in industry 4.0: a systematic literature review. *Sustainability*, 2021, vol. 13, pp. 1–23. DOI: 10.3390/su13158272.
6. Pimenova E.M., Arutyunyan A.A. Berezhlivoe proizvodstvo kak odin iz sposobov povysheniya ekonomicheskoi bezopasnosti predpriyatiya [Lean manufacturing as a path toward greater business security]. *Kreativnaya ekonomika = Journal of Creative Economy*, 2023, vol. 17, no. 11, pp. 4141–4152. DOI: 10.18334/ce.17.11.119405.
7. Fernandes M., Correia D., Teixeira L. Lean maintenance practices in the improvement of information management processes: a study in the Facility. *Procedia Computer Science*, 2024, vol. 232, pp. 2269–2278. DOI: 10.1016/j.procs.2024.02.046.
8. Karch S., Lüder A., Listl C., Nowacki N.S., Hassan K., Werner R., Hohmann T., Müller S. Lean Engineering – Identifying waste in engineering chains. *Procedia CIRP*, 2023, vol. 120, pp. 463–468. DOI: 10.1016/j.procir.2023.09.020.
9. Suetina T.A., Odinokov M.Y., Safina D.M. Benefits of project management at lean manufacturing tools implementation. *Asian Social Science*, 2014, vol. 10 (20), pp. 62–66. DOI: 10.5539/ass.v10n20p62.
10. Sundararajan N., Terkar R. Improving productivity in fastener manufacturing through the application of Lean-Kaizen principles. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 62 (2), pp. 1169–1178. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.350.
11. Botti L., Mora C., Regattieri A. Integrating ergonomics and lean manufacturing principles in a hybrid assembly line. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, vol. 111, pp. 481–491. DOI: 10.1016/j.cie.2017.05.011.
12. Rahimyanov Kh.M., Krasilnikov B.A., Yanpolsky V.V., Krasilnikov D.B. Elektrokhimicheskaya obrabotka bezvol'framovykh tverdykh splavov [Electrochemical processing of tungsten carbide]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2010, no. 3 (48), pp. 3–7.
13. Zhang X., Huang R., Liu K., Kumar A.S., Deng H. Suppression of diamond tool wear in machining of tungsten carbide by combining ultrasonic vibration and electrochemical processing. *Ceramics International*, 2018, vol. 44, pp. 4142–4153. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.11.215.
14. Katiyar P.K., Randhawa N.S. A comprehensive review on recycling methods for cemented tungsten carbide scraps highlighting the electrochemical techniques. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2020, vol. 90, p. 105251. DOI: 10.1016/j.jrmhm.2020.105251.
15. Denkena B., Krödel A., Lang R. Fabrication and use of Cu-Cr-diamond composites for the application in deep feed grinding of tungsten carbide. *Diamond and Related Materials*, 2021, vol. 120, p. 108668. DOI: 10.1016/j.diamond.2021.108668.
16. Rakhimyanov Kh.M., Yanpolskiy V.V., Yusupov A.S. Struinaya elektrokhimicheskaya obrabotka stali 110G13L [Jet electrochemical machining of the steel 110G13L]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2016, no. 2 (30), pp. 34–38. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-2-34-38.
17. Liu Z., Qiu Z.J., Heng C., Qu N.S. Electrochemical micro drilling of stainless steel with tool electrode jump motion. *Materials Science Forum*, 2009, vol. 626–627, pp. 333–338. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.626-627.333.
18. Anasane S.A., Bhattacharyya B. Experimental investigation on suitability of electrolytes for electrochemical micromachining of titanium. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 86, pp. 2147–2160. DOI: 10.1007/s00170-015-8309-2.
19. Singh R.P., Trehan R. Electrochemical machining and allied processes: a comprehensive review. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2023, vol. 27, pp. 3189–3256. DOI: 10.1007/s10008-023-05610-x.
20. Wang M., Zhang Y., He Z., Peng W. Deep micro-hole fabrication in EMM on stainless steel using disk micro-tool assisted by ultrasonic vibration. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, vol. 229, pp. 475–483. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.10.004.
21. Xu Z., Liu J., Zhu D., Qu N., Wu X., Chen X. Electrochemical machining of burn-resistant Ti40 alloy. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, vol. 28, pp. 1263–1272. DOI: 10.1016/j.cja.2015.05.007.

22. Liu G., Gong Z., Yang Y., Shi J., Liu Y., Dou X., Li C. Electrochemical dissolution behavior of stainless steels with different metallographic phases and its effects on micro electrochemical machining performance. *Electrochemistry Communications*, 2024, vol. 160, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.elecom.2024.107677.
23. Zanjani M.Y., Hackert-Oschätzchen M., Martin A., Meichsner G., Edelmann J., Schubert A. Process control in jet electrochemical machining of stainless steel through inline metrology of current density. *Micromachines*, 2019, vol. 10, pp. 245–272. DOI: 10.3390/mi10040261.
24. Puchkov Yu.A., Poklad V.A., Shkretov Yu.P. A study of coatings on high-temperature nickel alloys by the potentiodynamic method. *Metal Science and Heat Treatment*, 2005, vol. 47, pp. 239–243. DOI: 10.1007/s11041-005-0059-6.
25. Wang M.H., Liu W., Peng W. Multiphysics research in electrochemical machining of internal spiral hole. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 74, pp. 749–756. DOI: 10.1007/s00170-014-5938-9.
26. Evans K.J., Rebak R.B. Repassivation potential of alloy 22 in chloride plus nitrate solutions using the potentiodynamic-galvanostatic-potentiostatic method. *Materials Research Society Symposia Proceedings*, 2006, vol. 985, pp. 1–7. DOI: 10.1557/PROC-985-0985-NN03-13.
27. Davydov A.D., Volgin V.M., Lyubimov V.V. Electrochemical machining of metals: Fundamentals of electrochemical shaping. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2004, vol. 40, pp. 1230–1265. DOI: 10.1007/s11175-005-0045-8.
28. Freiman L.I., Makarov V.A., Bryskin I.E. *Potentsiostaticheskie metody v korrozionnykh issledovaniyakh i elektrokhimicheskoi zashchite* [Potentiostatic methods in corrosion research and electrochemical protection]. Leningrad, Khimiya Publ., 1972. 240 p.
29. Sedykin F.V. *Razmernaya elektrokhimicheskaya obrabotka detalei mashin* [Dimensional electrochemical processing of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 302 p.
30. Volosatov V.A., ed. *Spravochnik po elektrokhimicheskim i elektrofizicheskim metodam obrabotki* [Handbook of electrochemical and electrophysical processing methods]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1988. 719 p. ISBN 5-217-00267-0.
31. Baisupov I.A., Volosatov V.A. *Spravochnik molodogo rabochego po elektrokhimicheskoi obrabotke* [The young worker's guide to electrochemical machining]. 2nd ed., rev. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 176 p. ISBN 5-06-000932-7.
32. Baisupov I.A. *Elektrokhimicheskaya obrabotka metallov* [Electrochemical processing of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 220 p.
33. Poduraev V.N., Kamalov V.S. *Fiziko-khimicheskie metody obrabotki* [Physico-chemical processing methods]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 346 p.
34. Kolotyryn Ya.M., Florianovich G.M. Anomal'nye yavleniya pri rastvorenii metallov [Anomalous phenomena during the dissolution of metals]. *Itogi nauki. Elektrokhiimiya = Results of science. Electrochemistry*, 1971, no. 7, pp. 5–64.
35. GOST 1435–99. *Prutki, polosy i motki iz instrumental'noi negelirovannoi stali. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [State Standard 1435–99. Bars, strips and reels of tool unalloyed steel. General specifications]. Minsk, Standards Publ., 1999. 23 p.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).