



2.5.6 – технология машиностроения

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ
ИЗМЕНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ
ЭЛЕКТРОЛИТА И ВЫХОДА ПО ТОКУ
МЕТАЛЛА НА ЛОГАРИФМИЧЕСКИЙ
ИНДЕКС РАССЕИВАНИЯ
ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ
РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ**

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF
THE IMPACT ON CHANGES
IN THE EFFECTIVE ELECTRICAL
CONDUCTIVITY OF THE ELECTROLYTE
AND THE METAL CURRENT
EFFICIENCY ON THE LOGARITHMIC
DISPERSION INDEX DURING
ELECTROCHEMICAL MACHINING**

Болдырев Александр Александрович,
к.т.н., доцент кафедры технологии машино-
строения, Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж,
e-mail: alexboldyrev@yandex.ru

Boldyrev Alexander Aleksandrovich,
candidate of technical sciences, associate professor of
the department of mechanical engineering technol-
ogy, Voronezh state technical university, Voronezh,
e-mail: alexboldyrev@yandex.ru

Григораш Владимир Васильевич,
к.т.н., доцент кафедры металлических и
деревянных конструкций, Воронежский
государственный технический университет,
г. Воронеж.

Grigorash Vladimir Vasilyevich,
candidate of technical sciences, associate professor of
the department of metal and wooden structures,
Voronezh state technical university, Voronezh.

Болдырев Александр Иванович,
д.т.н., профессор кафедры технологии маши-
ностроения, Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж.

Boldyrev Alexander Ivanovich,
doctor of technical sciences, professor of the de-
partment of mechanical engineering technology,
Voronezh state technical university, Voronezh.

Падурец Анна Александровна,
магистр кафедры технологии машиностро-
ения, Воронежский государственный техниче-
ский университет, г. Воронеж.

Padurets Anna Alexandrovna,
master's student of the department of mechanical
engineering technology, Voronezh state technical
university, Voronezh.

✉¹ **Перова Алла Владимировна,**
к.т.н., доцент кафедры технологии машино-
строения, Воронежский государственный
технический университет, г. Воронеж,
e-mail: pva7@mail.ru

✉¹ **Perova Alla Vladimirovna,**
candidate of technical sciences, associate professor of
the department of mechanical engineering technol-
ogy, Voronezh state technical university, Voronezh,
e-mail pva7@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена изучению
вопросов электрохимической размерной
обработки. Показано, что при высокоско-
ростном анодном растворении никеля,
хрома и сплавов ХН78Т и ХН77ТЮРУ в
растворах NaCl, NH₄Cl, NaNO₃, NH₄NO₃,

Annotation. The article is devoted to studying is-
sues of electrochemical machining. It is shown
that during high-speed anodic dissolution
of nickel, chromium, and alloys
ХН78Т and ХН77ТЮРУ in solutions of
NaCl, NH₄Cl, NaNO₃, NH₄NO₃, NaClO₃, the

NaClO₃ основными факторами, определяющими логарифмический индекс рассеивания, являются изменение эффективной электропроводности электролита с изменением межэлектродного зазора и изменении выхода по току с плотностью тока.

main factors determining the logarithmic dispersion index are the change in the effective electrical conductivity of the electrolyte with the change in the interelectrode gap and the change in current efficiency with current density.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ РАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА, ЛОГАРИФМИЧЕСКИЙ ИНДЕКС РАССЕЙВАНИЯ, ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ЭЛЕКТРОЛИТА, ВЫХОД ПО ТОКУ МЕТАЛЛА.

Keywords: ELECTROCHEMICAL MACHINING, LOGARITHMIC DISPERSION INDEX, ELECTROLYTE CONDUCTIVITY, METAL CURRENT EFFICIENCY.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Развитие электрохимической размерной обработки (ЭХРО) вызвало необходимость более глубокого понимания причин и факторов, определяющих точность формообразования, которая в значительной степени зависит от электрохимических свойств пары металл – рабочая среда (электролит).

Одним из путей повышения точности может являться снижение рассеивающей способности электролита (РСЭ). Используемые в практике электроосаждения уравнения для оценки РСЭ (Хэринга – Блюма, Филда, Хитлея – Пэна) дают различные числовые значения, и, что более существенно, эти значения изменяются с изменением линейного соотношения L [1, 2]. В своих работах Д.-Т. Чин показал, что зависимость весового отношения M от линейного наилучшего образа описывается функцией вида [3]:

$$M = L^{1/A}. \quad (1)$$

где $A = \lg L / \lg M$ – логарифмический индекс рассеивания (ЛИР).

Учитывая, что

$$M = v_{p0}/v_p \quad \text{и} \quad L = \delta/\delta_0, \quad (2)$$

где $v_p = d\delta/dt$ – скорость растворения; t – время; δ – текущий межэлектродный зазор (МЭЗ), мм; v_{p0} и δ_0 – скорость растворения и МЭЗ в начальный момент времени.

Сравнение линейного [4] и ЛИР показало, что последний лучше согласуется с экспериментальными данными [5].

Определение РСЭ при ЭХРО осложняется быстрым изменением условий анодного растворения (величины зазора, скорости потока электролита и т.д.) Предложен простой способ измерения РСЭ в условиях высоких плотностей тока, характерных для ЭХРО, на основе регистрации кривых «зазор – время» и использовании ЛИР [3].

После ряда преобразований из формулы (1) получено

$$t = (L^n - 1)\delta_0/v_{p0}n, \quad (3)$$

где $n = \frac{1}{A} + 1$.

Из выражения (3) следует, что зависимость t от L^n линейна. Численное значение n может быть найдено методом проб и ошибок либо графическим дифференцированием кривой

$L - t$. Очевидно, что регистрация изменения МЭЗ во времени – простой и эффективный способ измерения РСЭ в условиях ЭХРО. Полученная таким образом информация может быть непосредственно использована для расчета электрода-инструмента для ЭХРО.

Настоящая работа посвящена выяснению причин, определяющих ЛИР – количественный критерий РСЭ при ЭХРО – в зависимости от условий электролиза: изменения эффективной электропроводности электролита и выхода по току металла в функции от плотности тока.

2 Материалы и методы

В качестве объектов исследования были выбраны никель и хром, являющиеся основными легирующими компонентами ряда жаропрочных сплавов, а также стали ХН78Т (ГОСТ 25054-81) и ХН77ТЮРУ (ГОСТ 23705-79). В качестве электролитов для ЭХРО использовались водные растворы хлористого натрия ($NaCl$), хлорида аммония (NH_4Cl), нитрата натрия ($NaNO_3$), нитрата аммония (NH_4NO_3), хлората натрия ($NaClO_3$), концентрации которых обеспечивали постоянную электропроводность $\kappa = 0,170 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ при температуре $25 \pm 1^\circ \text{C}$.

Измерения проводились на экспериментальной установке, описанной в работах [6, 7] и изготовленной на Воронежском механическом заводе, на вращающемся дисковом электроде с изолированной боковой поверхностью, обтекаемом потоком электролита, при плотности тока $20-50 \text{ А/см}^2$. В отличие от работы [3] выход металлу по току η определялся гравиметрически при одновременной регистрации плотности тока.

Для выполнения предпосылок идеального процесса электрохимического формообразования (постоянства выхода по току металла, электропроводности электролита и величин электродных потенциалов) зависимость МЭЗ от времени для двух плоскопараллельных электродов определялась по зависимости [8, 9]

$$\delta = \sqrt{\delta_0^2 + (2\varepsilon\delta_0 j_0 t)/\gamma}, \quad (4)$$

где δ и δ_0 зазоры, мм; ε – электрохимический эквивалент металла, г/(А·час); γ – плотность металла г/мм³; j_0 – начальная плотность тока, А/мм²; t – время, час.

С учетом выражения (2) время обработки составляло

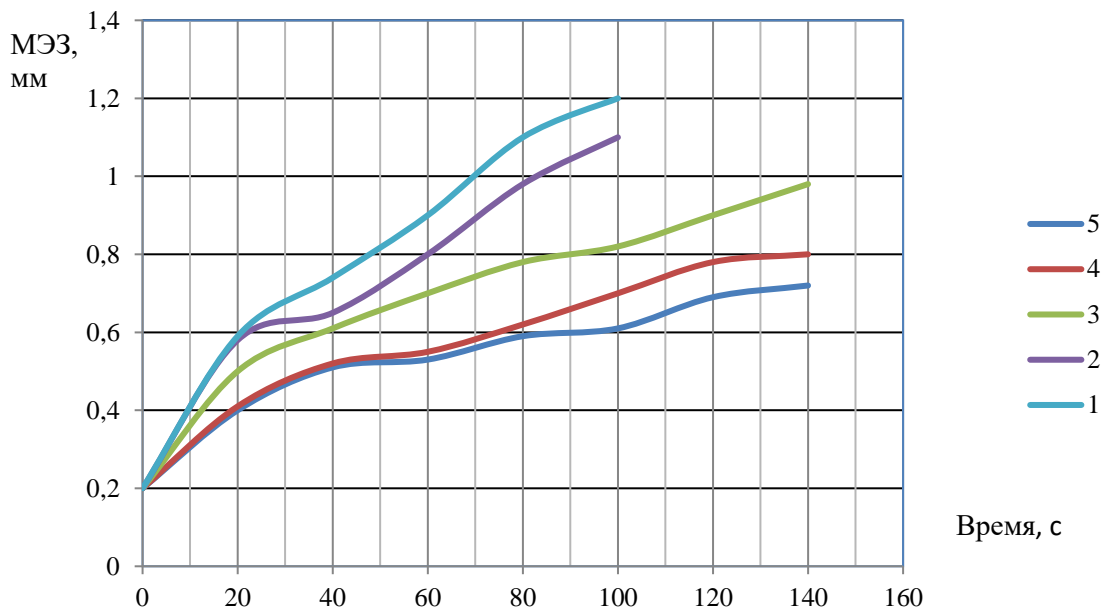
$$t = [\delta_0(L^2 - 1)]/2v_{p0}, \quad (5)$$

где $v_{p0} = \varepsilon j_0 / \gamma$.

Следовательно, для данного случая $A = 1/(n - 1) = 1$.

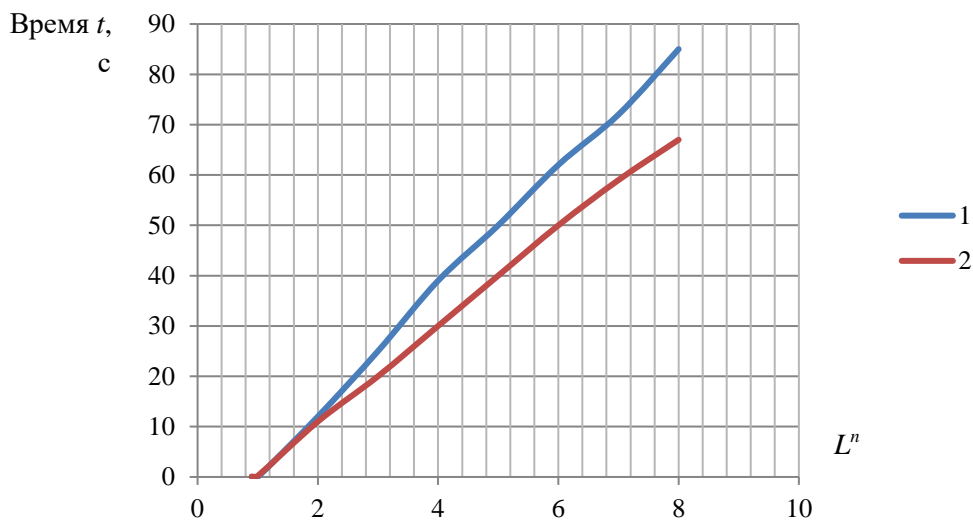
3 Результаты исследований

При растворении хрома ($U = 15 \text{ В}$, $\delta_0 = 0,3 \text{ мм}$, скорость течения электролита $W = 5,4 \text{ м/с}$) измеренные значения зазора превышают расчетные (рис. 1). Значения A , найденные для этих условий (рис. 2 и табл. 1 и 2), заметно отличаются от единицы, что обусловлено отклонениями реальных режимов от идеальных условий обработки. Причиной такого отклонения может быть изменение эффективной электропроводности электролита в процессе электролиза. Расчеты показывают, что разогрев электролита в МЭЗ за счет выделения джоулева тепла при заданной скорости протока весьма мал, и, следовательно, изменением электропроводности по этой причине можно пренебречь. Вероятно, основной причиной изменения электропроводности является переменное во времени газонаполнение в МЭЗ.



1-3 – никель; 4, 5 – хром;
 1, 2 – раствор NH_4Cl (90 г/л); 3, 5 – раствор NH_4NO_3 (150 г/л);
 2, 5 – расчетные значения по формуле (4); 1, 3, 4 – экспериментальные кривые,
 полученные при постоянной скорости течения электролита

Рисунок 1 – Изменение зазора от времени анодного растворения



1 – при постоянной скорости течения электролита ($n = 1,6$; $A = 1,6$);
 2 – при переменной скорости течения электролита ($n = 2,0$; $A = 1,0$)

Рисунок 2 – Расчетная зависимость $t - L^n$ для анодного растворения никеля в растворе NH_4Cl (90 г/л)

Во второй серии экспериментов по анодному растворению хрома скорость течения электролита в МЭЗ изменялась обратно пропорционально изменению величины зазора с целью поддержания постоянства электропроводности электролита ($W = 7,5$ м/с). Эффективная электропроводность при этом поддерживалась постоянной и равной $\kappa = 0,105 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. В этом случае имелось хорошее согласование экспериментальных и расчетных данных, а величина A равнялась единице (табл. 1 и 2, рис. 1 и 2).

Таблица 1 – Значения логарифмического индекса рассеивания A и выхода металла по току η при постоянной скорости течения электролита

Металл	Параметр	$NaCl$ 150 г/л	NH_4Cl 90 г/л	$NaNO_3$ 330 г/л	NH_4NO_3 150 г/л	$NaClO_3$ 450 г/л
Хром	A	1,67	1,25	1,43	1,43	1,43
	η	1,02	1,01	1,02	0,99	1,01
Никель	A	1,43	1,67	1,25	0,50	1,43
	η	0,98	0,95	0,87-0,96	0,28-0,75	1,05
ХН78Т	A	1,43	1,43	1,54	1,67	1,43
	η	1,18	1,16	0,99	1,00	0,97
ХН77ТЮРУ	A	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43
	η	1,07	1,10	1,05	1,03	1,01

Таблица 2 – Значения логарифмического индекса рассеивания A и выхода металла по току η при переменной скорости течения электролита

Металл	Параметр	$NaCl$ 150 г/л	NH_4Cl 90 г/л	$NaNO_3$ 330 г/л	NH_4NO_3 150 г/л
Хром	A	1,00	1,00	1,00	1,00
	η	1,04	1,00	1,01	1,01
Никель	A	1,00	1,00	1,25	1,00
	η	0,96	0,96	0,94	0,73
ХН78Т	A	1,00	1,00	1,00	1,00
	η	1,20	1,16	0,99	0,97
ХН77ТЮРУ	A	0,91	0,91	1,00	1,11
	η	1,07	1,11	1,03	1,03

Аналогичные измерения были проведены при анодном растворении никеля. В хлоридных растворах растворение никеля происходит с выходом по току η , равным 0,96 и не зависящим от плотности тока. Подобно хрому никель при поддержании постоянной эффективной электропроводности дает $A = 1$, а при постоянной скорости потока РСЭ возрастает. В пассивирующих электролитах (нитратных и хлоратных) растворение происходит в транспассивной области с одновременным выделением кислорода, а η возрастает с увеличением плотности тока. В растворе NH_4NO_3 (150 г/л) η изменялся от 0,28 до 0,75 при изменении плотности тока от 26 до 46 А/см² ($W = 5,4$ м/с). В этом случае $A = 0,5$. В растворе $NaNO_3$ (330 г/л) изменение η практически в том же интервале плотностей тока (23-49 А/см²) достаточно мало (0,87-0,96) и A снижается незначительно. При $U = 8$ В (в табл. 1 и 2 приведены данные, полученные только при $U = 15$ В) в интервале $j = 10-21$ А/см² происходит большее снижение A (до 0,8) вследствие более резкого выхода по току (0,44-0,70). Аналогичная картина наблюдается в растворах $NaClO_3$. При высоких плотностях тока вследствие постоянства η (1,05) в растворе $NaClO_3$ значение A больше (1,4).

Повышение η с ростом j объясняется анодно-анионной активацией [10-12]. Увеличение концентрации аниона (NO_3^- , ClO_3^-) облегчает анодно-анионную активацию и кривая $\eta - j$ сдвигается в сторону меньших плотностей тока при постоянной скорости течения электролита ([13], рис. 2). При повышении концентрации NH_4NO_3 до 300 г/л происходит увеличение η в том же интервале плотностей тока (25-47 А/см²). Выход металлу по току изменяется при этих плотностях тока от 0,78 до 0,95. Значения A в этом растворе увеличиваются до 1,25 ($A = 0,5$ при концентрации 150 г/л в том же растворе).

При переменной скорости протока в пассивирующих электролитах η остается приблизительно постоянным, а величина ЛИР близка к единице (табл. 2). Это может быть связано с изменением η при изменении скорости течения электролита [15]. В некоторых случаях скорость изменения η может превышать снижение плотности тока с увеличением МЭЗ, и РСЭ возрастает. Так, $A = 0,5$ при $W = \text{const}$ и $A = 1,0$ при $W \neq \text{const}$ для раствора NH_4NO_3 (150 г/л).

Изменение РСЭ различных электролитов при анодном растворении сплавов ХН78Т и ХН77ТЮРУ показало, что их поведение аналогично поведению хрома, η во всех случаях оста-

вался постоянным: в хлоридах – 1,17 для ХН78Т и 1,10 для ХН77ТЮРУ, а в пассивирующих электролитах – $\eta \approx 1,0$. Возможные причины этого рассмотрены в работе [14]. Очевидно, что величина РСЭ в этих условиях зависит от изменения эффективной электропроводности электролита.

В ряде работ [16, 17 и др.] способность пассивирующих электролитов обеспечивать высокую точность формообразования при ЭХРО связывается с формой поляризационной кривой. При высоких плотностях тока и малых МЭЗ, имеющих место при ЭХРО, форма поляризационной кривой, как правило, не оказывает существенного влияния на распределения тока [15]. Повышение точности формообразования при ЭХРО указанных выше металлов и сплавов в реальных условиях возможно посредством конструктивных и технологических приемов, например, обработка импульсным током.

4 Обсуждение и заключение

При заданных условиях электролиза и постоянной скорости течения электролита определяющее влияние на логарифмический индекс рассеивания оказывает изменение электропроводности электролита с увеличением межэлектродного зазора.

Основными факторами, определяющими изменение рассеивающей способности электролита при электрохимической размерной обработке, является зависимость выхода металла по току от плотности тока и изменение эффективной электропроводности электролита. Как следует из приведенных выше данных, при постоянстве выхода металла по току и электропроводности электролита анодное растворение хрома, сплавов ХН78Т и ХН77ТЮРУ, а также никеля в хлоридных растворах происходит в соответствии с закономерностями, описываемыми уравнением идеального процесса электрохимического формообразования.

Высокая точность обработки никеля может быть достигнута в растворах нитратов, однако при этом следует учитывать, что имеется оптимальная область рабочих условий, связанная с резким перегибом кривой выхода металла по току от плотности тока. Для достижения высокой точности в заданном интервале плотностей тока необходимы соответствующие концентрации электролита и гидродинамические условия.

Список литературы

- 1 Березин, Н.Б. Электроосаждение металлов и сплавов из водных растворов комплексных соединений: монография / Н.Б. Березин [и др.]. Казань: Издательство Казанского государственного технологического университета, 2006. – 276 с.
- 2 Hamburg Yu. D., Sungari D. Theory and Practice of Metal Electrodeposition. М.: Лаборатория знаний, 2020. – 441 с.
- 3 Chin D.-T., Wallace A. J. Jr. Electrochemical Machining: A Note on the Throwing Power of Electrolytes // J. Electrochem. Soc. 1991. 118. P. 831-839.
- 4 Chin D.-T. Algorithms Throwing Index for the Measurement of Throwing Powers // J. Electrochem. Soc. 1991. 118. P. 818-825.
- 5 Эршлер, А.Б. Гальваностатические методы в исследовании механизмов электрохимических реакций // Электросинтез и биоэлектрохимия. – 1995. – № 11. – С. 199-251.
- 6 Estimation of the process localization at the electrochemical machining by microsecond pulses of bipolar current / A.N. Zaitsev [and oth.] // Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, Scotland, 2004. Vol.149/1-3. P.475-481.
- 7 Веневцев, А.Ю. Экспериментальная установка для электрохимического формообразования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 9. – С. 49-52.
- 8 Теория электрических и физико-химических методов обработки. Обработка материалов с применением инструмента / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, Е.В. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, И.Т. Коптев. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2008. – 248 с.
- 9 Зайцев, А.Н. Электрохимическая обработка. Теория, технология, оборудование. М. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 663 с.
- 10 Давыдов А.Д., Козак Е. Высокоскоростное электрохимическое формообразование. М.: Наука, 1990. – 271 с.
- 11 Донцов, М.Г. Электрохимическая размерная обработка металлов и сплавов. Проблемы теории и практики: монография. Иваново: Ивановский государственный химико-технологический университет. – 2006. – 282 с.

12 Давыдов А.Д., Мирзоев Р.А. Анодные процессы электрохимической и химической обработки металлов: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 440 с.

13 Влияние параметров потока электролита при электрохимической размерной обработке на качество формообразования отверстий в деталях ракетно-космической техники / А.И. Болдырев, А.А. Болдырев, В.Н. Сухоруков, И.Г. Стародубцев // Воронежский научно-технический вестник. – 2021. – Т. 3. – № 3 (37). – С. 3-10.

14 Силкин С.А., Петренко В.И., Дикусар А.И. Анодное растворение электролитических хромовых покрытий в электролитах для электрохимической размерной обработки. Скорость растворения и шероховатость поверхности // Электронная обработка материалов. – 2010. – № 1. – С. 4-11.

15 Landolt D. Throwing Power Measurements during High Rate Nickel Dissolution under Active and Transpassive Conditions // J. Electrochem. Soc. 1992. 119. P. 708-714.

16 Атанасянц А.Г. Анодное поведение металлов: учебное пособие. М.: Metallurgy, 1989. – 150 с.

17 An Investigation of the Difference between NaCl and NaClO₃ as Electrolytes in Electrochemical Machining / J.P. Hoare, M.A. Loboda, M.L. Millan, A.J.Jr. Wallace // J. Electrochem. Soc. 1989. 116. P. 119-131.

References

1 Berezin, N.B. Electrodeposition of Metals and Alloys from Aqueous Solutions of Complex Compounds: A Monograph / N.B. Berezin et al. Kazan: Kazan State Technological University Publishing House, 2006. – 276 p.

2 Hamburg Yu. D., Sungari D. Theory and Practice of Metal Electrodeposition. Moscow: Knowledge Laboratory, 2020. – 441 p.

3 Chin D.-T., Wallace A.J. Jr. Electrochemical Machining: Notes on the Throwing Power of Electrolytes // J. Electrochem. Soc. 1991. 118. pp. 831-839.

4 Chin D.-T. Throwing Index Algorithms for Measuring Throwing Power // Russ. 1991. 118. P. 818-825.

5 Ershler, A.B. Galvanostatic methods in conducting electrochemical action // Electrosynthesis and bioelectrochemistry. - 1995. - No. 11. - P. 199-251.

6 Evaluation of process localization during electrochemical processing with microsecond pulses of bipolar current / A.N. Zaitsev [et al.] // Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, Scotland, 2004. Vol. 149/1-3. P. 475-481.

7 Venetsev A.Yu. Experimental setup for electrochemical shaping // Bulletin of Tula State University. Technical sciences. - 2013. - No. 9. - P. 49-52.

8 Theory of electrical and physicochemical processing methods. Material Processing with the Use of Tools / V.P. Smolentsev, A.I. Boldyrev, E.V. Smolentsev, G.P. Smolentsev, I.T. Koptev. Voronezh: Voronezh State Technical University, 2008. – 248 p.

9 Zaitsev, A.N. Electrochemical Processing. Theory, Technology, Equipment. Moscow – Vologda: Infra-Engineering, 2024. – 663 p.

10 Davydov, A.D., Kozak, E. High-Speed Electrochemical Forming. Moscow: Nauka, 1990. – 271 p.

11 Dontsov, M.G. Electrochemical Dimensional Machining of Metals and Alloys. Problems of Theory and Practice: Monograph. Ivanovo: Ivanovo State University of Chemical Technology. – 2006. – 282 p.

12 Davydov A.D., Mirzoev R.A. Anodic processes of electrochemical and chemical processing of metals: a tutorial. St. Petersburg: Lan, 2022. – 440 p.

13 Study of electrolyte flow parameters during electrochemical dimensional machining on the quality of hole formation in rocket and space technology parts / A.I. Boldyrev, A.A. Boldyrev, V.N. Sukhorukov, I.G. Starodubtsev // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. – 2021. – Vol. 3. – No. 3 (37). – P. 3-10.

14 Silkin S.A., Petrenko V.I., Dikusar A.I. Anodic dissolution of electrolytic chromium coatings in electrolytes for electrochemical machining. Dissolution rate and surface roughness // Electronic processing of materials. – 2010. – No. 1. – P. 4-11.

15 Landolt D. Measurement of Propelling Power during High-Speed Dissolution of Nickel under Active and Transpassive Conditions // J. Electrochem. Soc. 1992. 119. P. 708-714.

16 Atanasyants A.G. Anodic Behavior of Metals: A Tutorial. Moscow: Metallurgy, 1989. – 150 p.

17 A Study of the Difference between NaCl and NaClO₃ as Electrolytes in Electrochemical Machining / J.P. Hoare, M.A. Loboda, M.L. Millan, A.J. Jr. Wallace // J. Electrochem. Soc. 1989. 116. P. 119-131.

© Болдырев А. А., Григораш В. В., Болдырев А. И.,
Падурец А. А., Перова А. В., 2026