



УДК 621.8

UDC 621.8

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА ЭЛЕКТРОФИЗИКОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE COMBINED METHOD OF MATERIAL PROCESSING

Сухоруков Владимир Николаевич, доцент кафедры технологии машиностроения, к.т.н., Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: suvn@mail.ru

Sukhorukov Vladimir Nikolaevich, associate professor of the department of mechanical engineering technology, candidate of technical sciences, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: suvn@mail.ru

✉¹ **Смоленцев Евгений Владиславович**, профессор кафедры технологии машиностроения, д.т.н., профессор, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

✉¹ **Smolentsev Evgeniy Vladislavovich**, professor of the department of mechanical engineering technology, doctor of technical sciences, professor, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

Бабенков Никита Николаевич, магистр кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, инженер-конструктор 2 категории ООО «ЭКОТЕХНИКА ХОЛДИНГ», г. Воронеж, e-mail: babenkoff.nikita@yandex.ru

Babenkov Nikita Nikolaevich, master of the department of mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, 2nd category design engineer, ECO-TEKHNIKA HOLDING LLC, Voronezh, e-mail: babenkoff.nikita@yandex.ru

Юхневич Сергей Степанович, и.о. заведующего кафедрой технологии машиностроения, к.т.н., доцент, Воронежский государственный технический университет, главный инженер АО КБХА, г. Воронеж, e-mail: serge1975@yandex.ru

Yukhnevich Sergey Stepanovich, acting head of the department of mechanical engineering technology, candidate of technical sciences, associate professor, Voronezh state technical university, chief engineer of JSC KBHA, Voronezh, e-mail: serge1975@yandex.ru

Аннотация. В данной работе изложено описание комбинированного метода обработки материалов, использующего принципы электрохимического электроэрозионного способа обработки. Приведены математические расчеты режимов проведения обработки, а также графики эффективности и точности обработки в зависимости от материалов, используемых в качестве рабочей среды.

Annotation. This paper describes a combined material processing method using the principles of an electrochemical electroerosion treatment method. Mathematical calculations of processing modes are given, as well as graphs of the efficiency and accuracy of processing, depending on the materials used as a working medium.

Ключевые слова: КОМБИНИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА, ЭЛЕКТРОХИМИЯ, ЭЛЕКТРОЭРОЗИЯ, МАТЕРИАЛ. **Keywords:** COMBINED PROCESSING, ELECTROCHEMISTRY, ELECTROEROSION, MATERIAL.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Благодаря развитию технологий в современном машиностроении, конфигурация изготавливаемых изделий становится все сложнее с каждым днём, а предъявляемые к таким деталям требования все строже и строже. Помимо этого, в условиях увеличивающейся конкуренции немаловажную роль играет время изготовления [1].

Современные конструкции и детали требуют нестандартного подхода. Например, для обработки пазов на обечайках сложной формы зачастую используются ручной труд, либо последовательное долбление каждого паза. Но на данном этапе обработки такой детали ошибка может быть фатальной, что значит нарушение сроков и неисправимый брак детали. Именно для подобных задач необходимо применение нетрадиционных методов обработки.

2 Материалы и методы

Проанализировав различные методы формообразования заданного объекта, можно утверждать, что применение комбинирования электрохимического и электро-эрозионного методов обработки позволит значительно повысить технологические показатели [1-5]. Этому способствуют небольшие габариты места обработки и соответствующие им небольшие припуски на обработку, что даже без принудительной прокачки рабочей среды позволяет достигать высоких скоростей снятия припуска. Данный факт, в свою очередь, положительно повлияет на эксплуатационные свойства, так как время воздействия поля минимально и, следовательно, погрешность профиля будет минимальна. Кроме того, за счет усилий, которые возникают в рабочей среде из-за разрядов между инструментом и деталью, сам собой решается вопрос удаления продуктов обработки. При этом уменьшается износ электрод-инструмента (ЭИ), увеличивается время между его правками и сокращаются затраты на перенастройку [6-8].

3 Результаты исследований

На рис. 1-5 показано последовательное моделирование процесса. После фрезерной обработки по сложному профилю паза неизбежно будут иметь накопленную погрешность и погрешность самого профиля паза. Она вызвана последовательными поворотами при обработке.

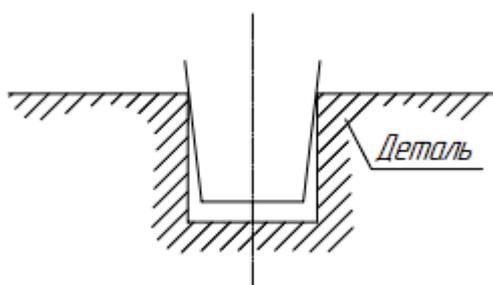


Рисунок 1 – Поиск теоретической продольной плоскости симметрии (оси в сечении) паза, располовинивание припуска на обработку концевых участков

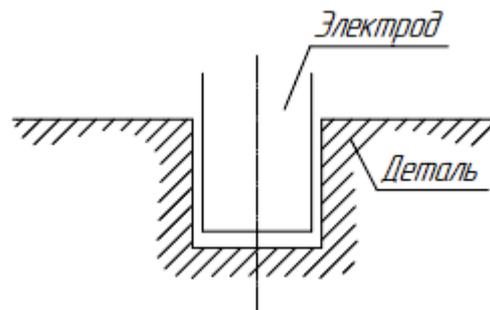


Рисунок 2 – Базирование всех электродов относительно продольной плоскости симметрии (оси в сечении) паза со стороны обработки

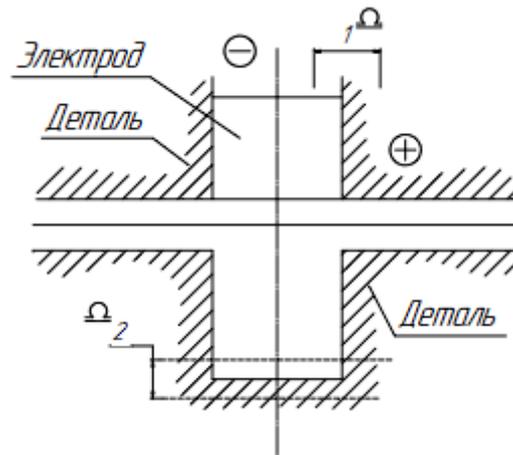


Рисунок 3 – Формирование концевых участков в пределах допусков 1 и 2

Для обработки необходимо определить боковые границы пазов на всей детали, что является сложной задачей. Базирование электрода выполняется по произвольному фрезерованному пазу с максимальным совмещением осей. Для этого используется приём симметричного перераспределения припусков, осуществляемый через базирование клиновидного фиксатора по боковым стенкам паза.

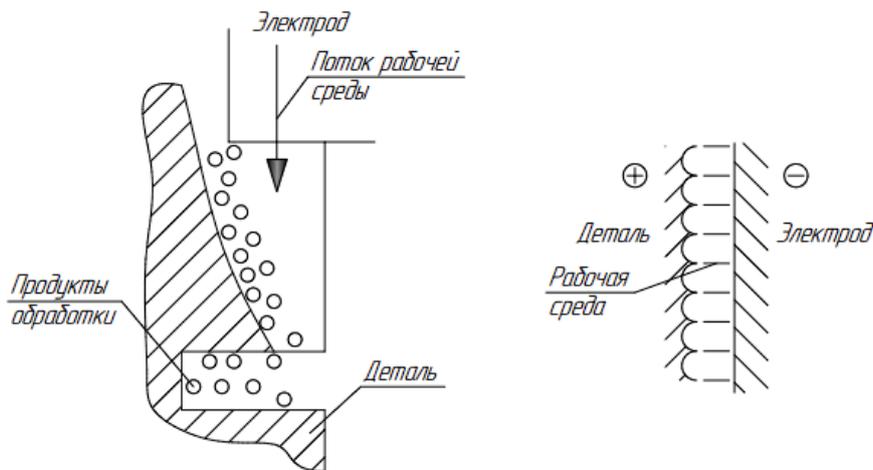


Рисунок 4 – Подача тока от генераторов для электроэрозионной и электрохимической обработки



Рисунок 5 – Вынос продуктов обработки

Основываясь на особенностях инструмента положение фиксатора тщательно устанавливается относительно рабочих элементов. Именно это положение определяет размеры области, которая будет обрабатываться. Для обеспечения точного углового расположения остальных элементов существует зона допуска, которая позволяет настроить инструмент. Точность выбора инструмента зависит от качества участка, который будет обрабатываться на детали. Получение радиальных пазов в процессе изготовления является довольно простой задачей. Она решается за счёт изготовления пазов при помощи станков с модулем ЧПУ, кроме того, возможно использование оптических делительных головок типа ОДГ-10А с целью деления под определённые углы. Важно отметить, что для настоящих заготовок отклонение размеров может составлять разницу между несколькими микронами и несколькими угловыми секундами наружного диаметра. Также следует отметить важность изоляции фиксатора от заготовки, поскольку она позволяет провести объективный контроль правильности базирования. Для этого применяется подача низковольтного тока (от 1В до 3В) через заготовку и электрод. Таким образом, нормальное положение характеризуется отсутствием металлического контакта между электродом и заготовкой.

Прошивка выполняется одновременным воздействием электрохимическим и электроэрозионным методами [8-11], при этом происходит их последовательное воздействие. Электроэрозия отвечает за растворение оксидной плёнки с поверхности, а также вызывает ритмичное колебание жидкости в межэлектродном зазоре. За счет этого скорость анодного растворения возрастает в разы благодаря происходящей депассивации. Особенно это проявляется при малой глубине обработки. Ритмичная пульсация обеспечивает постоянное вымывание продуктов эрозии из зоны обработки.

В результате комбинированной обработки шероховатость поверхности сравнима с показателями, которых можно достичь фрезерованием [12-15]. Однако иногда необходимо удалить прокалённый слой и уменьшить высоту образовавшихся неровностей. Такой эффект можно получить путём отключения электроэрозионного генератора с проведением анодного растворения без прокачки рабочей среды в течении короткого промежутка времени [16-18].

Для предотвращения возникновения короткого замыкания на конце применяется тонкая плёнка или наносится диэлектрический лак. Кроме того, перемещение электрода после обработки необходимо для калибровки участка паза с помощью инструмента, у которого профиль имеет меньший износ.

Важно помнить, что износ электрода приводит к изменению его размеров и формы, что требует корректировки рабочей части. Период между ремонтами и размер припуска определяют на основе износа боковых поверхностей и конечной части. Критерием для оценки является допустимое значение глубины и ширины паза, величина допуска для глубины и ширины паза.

Скорость удаления v материала при обработке напрямую зависит от глубины прошивки. Для отверстий сначала $v = 20-30$ мм/мин, но после преодоления 3-4 миллиметров скорость подачи уменьшается и становится близкой к электрохимической прошивке с прокачкой жидкости. Объяснить это можно скоростью удаления продуктов обработки, которая снижается из-за диффузионных ограничений [19-21].

На основе физического моделирования была разработана математическая модель, которая описывает взаимодействие поверхностей при сохранении заданных показателей. Из физической модели следует, что для улучшения характеристик процесса необходимо стремиться к максимальной скорости снятия материала, за счёт чего при соответствующем контроле будут обеспечиваться необходимые параметры точности и качество поверхностного слоя.

Шероховатость и глубина слоя являются основными параметрами оценки. Улучшение этих параметров происходит на финальной стадии обработки.

Без учёта данных параметров скорость можно определить по формуле [3]:

$$V_{\Sigma} = V_1 + V_2, \quad (1)$$

где V_{Σ} – скорость линейной подачи инструмента при комбинированной обработке, мм/с; V_1 – скорость анодного растворения материала при депассивации поверхности электроэрозионной составляющей мм/с; V_2 – скорость съёма материала электроэрозионной составляющей, мм/с.

Из [3] известно, что:

$$V_1 = \frac{\eta\alpha}{\gamma} \cdot \frac{\chi(U - \Delta U)}{S}, \quad (2)$$

где η – выход по току, безразмерный коэффициент; ΔU – потери напряжения в зазоре, В; U – напряжение на электродах, В; χ – проводимость, См/мм; S – межэлектродный зазор, мм; α – электрохимический эквивалент, мг/(А·с); γ – плотность обрабатываемого материала, мг/мм³.

По условиям для пробоя в среде данного электролита выбирается величина S . Она прямо пропорциональна электропроводимости и колеблется в интервале от 0,02 до 0,1 мм.

Из [3] скорость подачи за счёт электроэрозионной обработки составит:

$$V_2 = k_5 \cdot A_u \frac{1}{q \cdot \tau \cdot F}, \quad (3)$$

где k_5 – эмпирический коэффициент, зависящий от рабочей среды, режимов обработки, материалов и размеров электродов, мм·мс²/кг; A_u – энергия импульса, Дж; q – скважность импульсов, определяется как отношение периода повторения импульсов к их длительности; τ – длительность импульса, с; F – площадь обрабатываемой поверхности со стороны его торца, мм². Z – припуск, мм, определяемый от исходной поверхности прямо перед калибровкой. Если высота микронеровностей не превышает заданных в конструкторской документации значений, то припуск берётся равным слою, подлежащему удалению – T .

$$Z = T, \quad (4)$$

Если же требование чертежа к высоте неровностей после обработки не выполняется, то:

$$Z = T + (R_{Z1} - R_{Z2}), \quad (5)$$

где R_{Z1} – высота микронеровностей до обработки, мкм; R_{Z2} – высота неровностей, заложенная в чертеже, мкм.

Анодное растворение происходит только при минимальных межэлектродных зазорах и захватывает малую область. Схема процесса представлена на рис. 6.

При выключении электроэрозионного процесса зазор S не может быть меньше пробойного расстояния и составляет 0,02-0,08 мм.

Для неподвижных электродов время формирования поверхности составит:

$$t \geq \frac{S + Z}{2\eta \frac{\alpha}{\gamma} \chi(U - \Delta U)}. \quad (6)$$

Общее время обработки определяется по зависимости:

$$t_0 = \frac{L}{V_Z} + t, \quad (7)$$

где L – глубина обработки, мм.

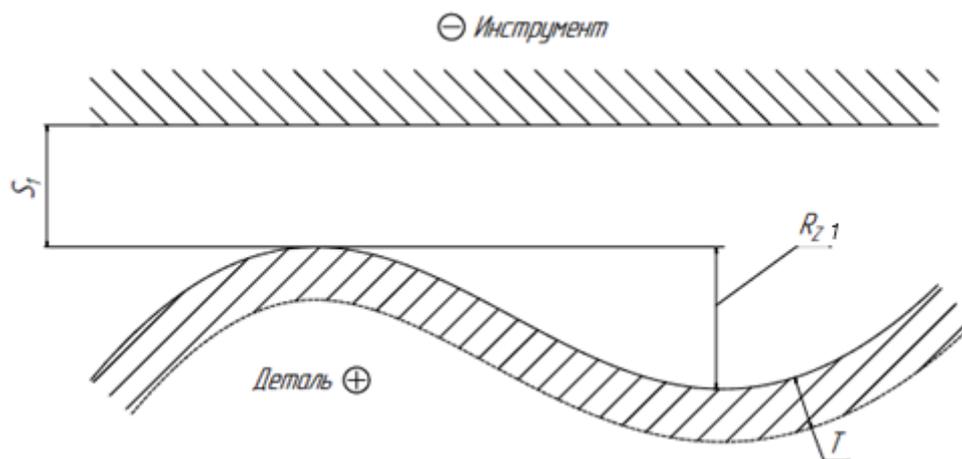


Рисунок 6 – Схема формирования качества поверхности на заключительном этапе обработки

Зависимость (5) является ключевой функцией, которая обеспечивает обработку соединяемых поверхностей. Для достижения точности соединения необходимо правильно определить форму и размеры используемого инструмента.

Технологические параметры обработки имеют влияние на изменение скорости комбинированной обработки и износ инструмента.

Принятие выражения (5) в качестве управляющей функции позволяет осуществлять эффективную обработку соединяемых поверхностей. Достижимая точность соединения зависит от формы и размеров используемого инструмента.

4 Обсуждение и заключение

На рис. 7 представлена диаграмма изменения скорости обработки в зависимости от силы тока различных материалов ЭИ толщиной 2,5 мм в среде с проводимостью 0,0254 См/м.

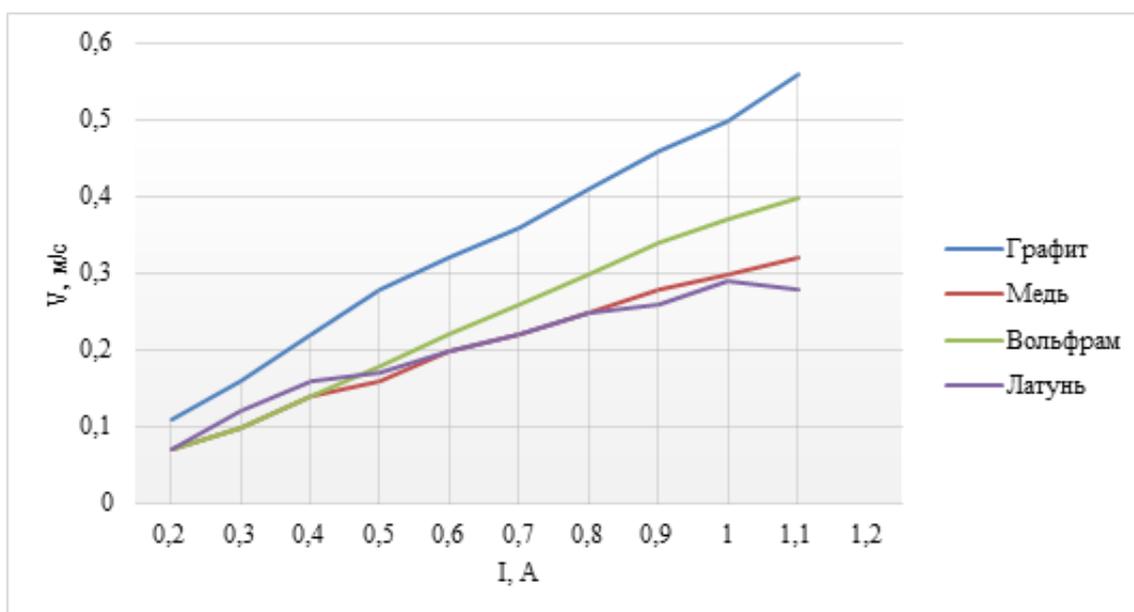


Рисунок 7 – График зависимости скорости обработки материала силы тока от электропроводности рабочей среды 15 % NaCl + 5 % NaNO₃

Предлагаемую обработку проводили в электролите, содержащем 15 % NaCl + 5 % NaNO₃. Проанализировав данные, полученные методом исследования, можно сказать, что скорость обработки постепенно увеличивается по мере увеличения напряжения на RC-генераторе.

Характер вышеприведённой зависимости варьируется от материала. Наилучший метод обработки достигается с помощью углеродного инструмента. В области стабильности процесса ($I = 0,6-1$ А) медь, медь и вольфрам имеют одинаковую скорость обработки.

Кроме того, важным фактором, оказывающим влияние на эффективность обработки, можно назвать электропроводность электролита, которая, в свою очередь, напрямую зависит от его состава. На диаграмме (рис. 8) представлена зависимость изменения скорости обработки V в зависимости от состава электролита и его проводимости χ .

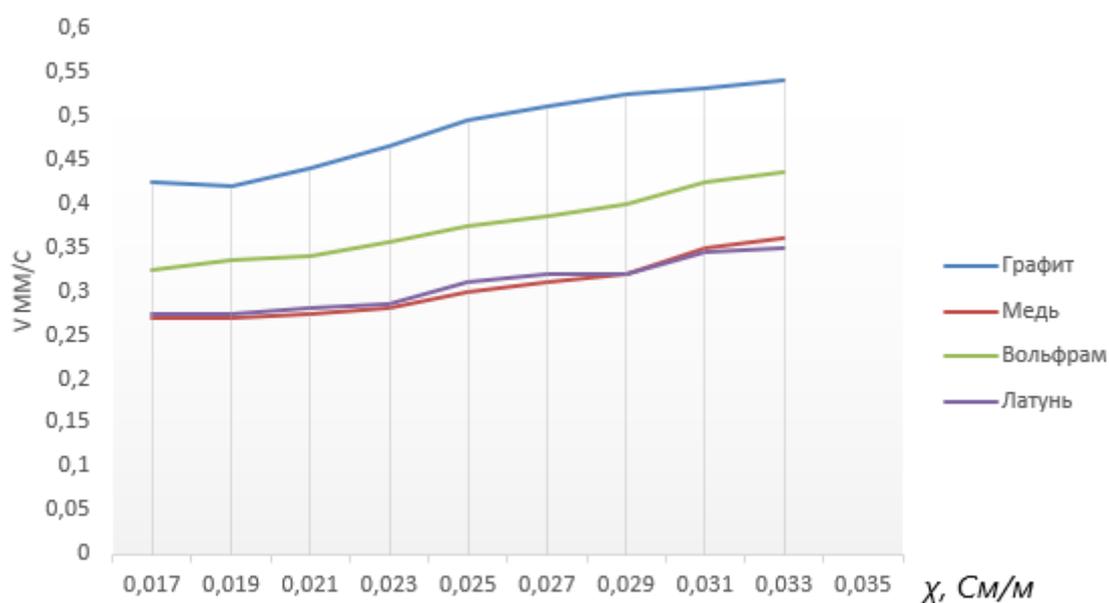


Рисунок 8 – График зависимости скорости комбинированной обработки от изменения соотношения NaCl и NaNO₃ в электролите при рабочем постоянном токе $I = 0,9$ А для различных материалов

Из графика видно, что скорость обработки повышается, но в пределах 10 %, хотя результаты экспериментов свидетельствуют о том, что износ ЭИ так же начинает увеличиваться. Последнее ведёт к снижению точности обработки, требует более частой переналадки станка, что в итоге сводит на нет выигрыш в производительности.

Таким образом, подтверждается тезис о том, что обоснованное применение комбинированных методов обработки с правильным выбором структуры воздействий, приводит к значительному выигрышу в показателях процесса. При этом затраты на технологию возрастают незначительно и быстро окупаются.

Список литературы

- 1 Справочник технолога (справочное издание) / под. ред. Суслова А.Г. // М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
- 2 Смоленцев, Е. В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М. Машиностроение. – 2005. – 511 с.
- 3 Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. В 2 т. / Под ред. В. П. Смоленцева. М: Высшая школа, 1983. – 247 с.
- 4 Комбинированные методы обработки / В. П. Смоленцев, А. И. Болдырев, А. В. Кузовкин, Г. П. Смоленцев, А. И. Часовских. – Воронеж: ВГТУ, 1996. – 168 с.

- 5 Смоленцев, В. П. Влияние электрохимической размерной обработки на физико-механические характеристики металлов // Электрохимическая обработка металлов. Сб. науч. тр. Кишинев: "Штиинца", 1972. – 226 с.
- 6 Сулима, А. М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А. М. Сулима, М. И. Евстигнеев. М.: Машиностроение, 1974. – 255 с.
- 7 Состояние и перспективы развития комбинированных методов обработки / Смоленцев В. П., Смоленцев Е. В. // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2017. – № 2 (41). – С. 5-9.
- 8 Абляз, Т. Р. Изучение изменения свойств электродов в зависимости от режимов проволоочно-вырезной электроэрозионной обработки // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. – 2011. – Т. 13. – № 1. – С. 87-93.
- 9 Абляз Т. Р., Шлыков Е. С., Кремлев С. С. Применение электродов-инструментов с покрытием для электроэрозионной обработки стали 38Х2Н2МА // СТИН. – 2017. – № 5. – С. 20-21.
- 10 Эмпирическое моделирование межэлектродного при электроэрозионной обработке стали 38Х2Н2МА / Т.Н. Абляз, Е.С. Шлыков, Д.А. Борисов, А.А. Шумков, И.Ю. Летягин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2017. – Т. 19, № 2. – С. 67-79.
- 11 Куц, В.В. Исследование процесса получения отверстий полым электродом на модернизированном электроэрозионном станке ЧПУ / В. В. Куц, М. С. Разумов, Д. А. Зубков, А.С. Бышкин, А. А. Неструев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 3. – С. 395-402.
- 12 Science-based technologies creation based on combined processing methods for fabrication aerospace filters / A. Yu. Ryazantsev, A.A. Shirokzhukhova, V.G. Gritsyuk // Materials Today: Proceedings, 19 (2019), 2065-2067 DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.075
- 13 Innovative Methods For Obtainig Artificial Roughness On The Surfaces Of Heat-Loaded Parts Of The Liquid Rocket Engines Combustion Chamber / A.Yu. Ryazantsev, A.A. Shirokzhukhova, Yukhnevich S.S. // AIP Conference Proceedings 2318, 030004 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0035987>.
- 14 Micro electrical discharge machining single discharge temperature field simulation / Z.L. Peng, Y.N. Li, D. Fang, Y.Y. Zhang. - USA: JCPRC5, 2013. - P. 859-864.
- 15 Jiajing Tang, Xiaodong Yang. A Thermo-hydraulic Modeling for the Formation Process of the Discharge Crater in EDM // 18th CIRP Conference ISEM XVIII. – 2016. – № 42. – P. 685-690.
- 16 Obara H. Detection of Discharging Position on WEDM // Proceedings of 10th ISEM, 1992 - p. 404-409.
- 17 Umang Maradia. Meso-Micro EDM: diss. Dr. sc. ETH Zurich No. 22024. - Zurich, 2014. - 246 p.
- 18 Matthias Hackert-Oschatzchen. Single Discharge Simulations of Needle Pulses for Electrothermal Ablation. - Rotterdam: COMSOL Conference, 2013. – P. 1-5.
- 19 Weingartner E., Kuster F., Wegener K. Modeling and simulation of electrical discharge machining // 1st CIRP Global Web Conference. – 2012. – № 2. – P. 74-78.
- 20 Chander Parkash Khatter Analysis of surface integrity in electrical discharge machining (EDM) process for tungsten carbide material: dis. Ph. D. – Patiala, India, 2010.
- 21 Kirillov, O. The technology of combined processing of extruded materials / O. Kirillov, V. Smolentsev, S. Yukhnevich // MATEC Web of Conferences: 2018 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2018, Sevastopol, 10–14 сентября 2018 года. – Sevastopol: EDP Sciences, 2018. – P. 01004. – DOI 10.1051/matecconf/201822401004. – EDN BYTCJA.
- 22 Yukhnevich, S. Provision of performance parameters of the product made from extruded materials by means of technological methods of combined processing / S. Yukhnevich, O. Kirillov, E. Kotukov // Materials Today: Proceedings: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2019, Sevastopol, 09–13 сентября 2019 года. Vol. 19. – Sevastopol: Elsevier Ltd, 2019. – P. 2382-2384. – DOI 10.1016/j.matpr.2019.08.039. – EDN JPJXTU.

References

- 1 Technologist's Handbook (reference edition) / ed. Suslova A.G. // М.: Innovative mechanical engineering, 2019. 800 p.
- 2 Smolentsev E.V. Design of electrical and combined processing methods М.: Mechanical engineering, 2005 - 511 p.

- 3 Electrophysical and electrochemical methods of materials processing: In 2 volumes/ Edited by V.P. Smolentsev. M.: Higher School, 1983.
- 4 Combined processing methods / V.P. Smolentsev, A.I. Boldyrev, A.V. Kuzovkin, G.P. Smolentsev, A.I. Chasovskikh. Voronezh: VSTU, 1996. 168 p.
- 5 Smolentsev V.P. The influence of electrochemical dimensional processing on the physical and mechanical characteristics of metals // Electrochemical processing of metals. Collection of scientific articles Chisinau: "Stiinza", 1972.
- 6 Sulima A.M. Surface layer quality and fatigue strength of parts made of heat-resistant and titanium alloys / A.M. Sulima, M.I. Evstigneev. M.: Mashinostroenie, 1974.
- 7 State and prospects of development of combined processing methods / Smolentsev V.P., Smolentsev E.V. // Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P.A. Solovyov. 2017. No. 2 (41). pp. 5-9.
- 8 Ablyaz T.R. Study of changes in the properties of electrodes depending on the modes of wire-cut electroerosion treatment // Bulletin of PSTU. Mechanical engineering, materials science. - 2011. - Vol. 13. - No. 1. - pp. 87-93.
- 9 Ablyaz T.P., Shlykov E.C., Kremlev S.S. Application of coated tool electrodes for electroerosion treatment of 38X2N2MA steel // STIN. - 2017. - No. 5. - pp. 20-21
- 10 Empirical modeling of interelectrode flow during electroerosion treatment of 38X2N2MA steel / T.N., Balyas, E.S. Shlykov, D.A. Borisov, A.A. Shumkov, I.Yu. // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science. - 2017. - Vol. 19, No. 2. - pp. 67-79.
- 11 Kutz V.V. Investigation of the process of obtaining holes with a hollow electrode on a modernized electroerosion CNC machine / V.V. Kutz, M.S. Razumov, D.A. Zubkov, A.S. Byshkin, A.A. Nestruev // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2020. No. 3. pp. 395-402.
- 12 Science-based technologies creation based on combined processing methods for fabrication aerospace filters / A.Yu. Ryazantsev, A.A. Shirokzhukhova, V.G. Gritsyuk // Materials Today: Proceedings, 19 (2019), 2065-2067 DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.075
- 13 Innovative Methods For Obtainig Artificial Roughness On The Surfaces Of Heat-Loaded Parts Of The Liquid Rocket Engines Combustion Chamber / A.Yu. Ryazantsev, A.A. Shirokzhukhova, Yukhnevich S.S. // AIP Conference Proceedings 2318, 030004 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0035987>
- 14 Micro electrical discharge machining single discharge temperature field simulation / Z.L. Peng, Y.N. Li, D. Fang, Y.Y. Zhang. - USA: JCPRC5, 2013. - P. 859-864.
- 15 Jiaying Tang, Xiaodong Yang. A Thermo-hydraulic Mod-eling for the Formation Process of the Discharge Crater in EDM // 18th CIRP Conference ISEM XVIII. - 2016. - № 42. - P. 685-690.
- 16 Obara H. Detection of Discharging Position on WEDM // Proceedings of 10th ISEM, 1992 - p. 404-409.
- 17 Umang Maradia. Meso-Micro EDM: diss. Dr. sc. ETH Zurich No. 22024. - Zurich, 2014. - 246 p.
- 18 Matthias Hackert-Oschatzchen. Single Discharge Simula-tions of Needle Pulses for Electrother-mal Ablation. - Rotterdam: COMSOL Conference, 2013. - P. 1-5.
- 19 Weingartner E., Kuster F., Wegener K. Modeling and sim-ulation of electrical discharge machin-ing // 1st CIRP Global Web Conference. - 2012. - № 2. - P. 74-78.
- 20 Chander Parkash Khatter Analysis of surface integrity in electrical discharge machining (EDM) process for tungsten carbide material: dis. Ph. D. - Patiala, India, 2010.
- 21 Kirillov, O. The technology of combined processing of extruded materials / O. Kirillov, V. Smolentsev, S. Yukhnevich // MATEC Web of Conferences: 2018 International Conference on Mod-ern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2018, Sevastopol , September 10–14, 2018. – Sevastopol: EDP Sciences, 2018. – P. 01004. – DOI 10.1051/mateconf/201822401004. – EDN BYTCJA.
- 22 Yukhnevich, S. Provision of performance parameters of the product made from extruded materials by means of technological methods of combined processing / S. Yukhnevich, O. Kirillov, E. Kotukov // Materials Today: Proceedings: International Conference on Modern Trends in Manufact-uring Technologies and Equipment, ICMTMTE 2019, Sevastopol, September 09–13, 2019. Vol. 19. – Sevastopol: Elsevier Ltd, 2019. – P. 2382-2384. – DOI 10.1016/j.matpr.2019.08.039. – EDN JPJX-TU.