

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-6-6



УДК 621.8

UDC 621.8

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ЗАГОТОВКУ**

**DESIGN OF TECHNOLOGY FOR IMPROVING THE QUALITY OF THE SURFACE LAYER UNDER THERMAL INFLUENCE ON THE WORKPIECE**

**Сухоруков Владимир Николаевич,**

к.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: [smolentsev.rabota@gmail.com](mailto:smolentsev.rabota@gmail.com)

**Sukhorukov Vladimir Nikolaevich,**

candidate of technical sciences, associate professor of the department of mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: [smolentsev.rabota@gmail.com](mailto:smolentsev.rabota@gmail.com)

**Куц Вадим Васильевич,**

д.т.н., профессор, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, e-mail: [kuc-vadim@yandex.ru](mailto:kuc-vadim@yandex.ru)

**Kuts Vadim Vasilyevich,**

doctor of technical sciences, professor, professor of the department of mechanical engineering technologies and equipment, South-West state university, Kursk, e-mail: [kuc-vadim@yandex.ru](mailto:kuc-vadim@yandex.ru)

**Милинчук Кирилл Александрович,** магистр кафедры «Технология машиностроения», Воронежский государственный технический университет, ведущий инженер-конструктор ГК «WESTEROS-SUGAR», г. Воронеж, e-mail: [lil-ovs@yandex.ru](mailto:lil-ovs@yandex.ru)

**Milinchuk Kirill Aleksandrovich,** master of the department of mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, leading design engineer of the WESTEROS-SUGAR Group of Companies, Voronezh, e-mail: [lil-ovs@yandex.ru](mailto:lil-ovs@yandex.ru)

✉<sup>1</sup> **Смоленцев Евгений Владиславович,** д.т.н., профессор, профессор кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: [smolentsev.rabota@gmail.com](mailto:smolentsev.rabota@gmail.com)

✉<sup>1</sup> **Smolentsev Evgeniy Vladislavovich,** doctor of technical sciences, professor, professor of the department of mechanical engineering technology, Voronezh state technical university, Voronezh, e-mail: [smolentsev.rabota@gmail.com](mailto:smolentsev.rabota@gmail.com)

**Аннотация.** В статье представлено проектирование технологии повышения качества поверхностного слоя при термическом воздействии на заготовку. Рассмотрен метод, который позволяет достичь высокого уровня упрочнения без нанесения на поверхность слоя покрытия. Приведены результаты исследований по упрочнению поверхности без нанесения слоя материала.

**Annotation.** The article presents the design of a technology for improving the quality of the surface layer under thermal action on the workpiece. A method is considered that allows achieving a high level of hardening without applying a coating layer to the surface. The results of studies on surface hardening without applying a layer of material are presented.

**Ключевые слова:** ТЕХНОЛОГИЯ, ФОРМО- ОБРАЗОВАНИЕ, КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ, ИНСТРУМЕНТ, УПРОЧНЕНИЕ, СТРУКТУРА. **Keywords:** TECHNOLOGY, FORMING, SURFACE QUALITY, TOOL, HARDENING, STRUCTURE.

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

## 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Уже достаточно давно известна технология криогенной обработки сталей, применение которой способствует увеличению их твёрдости, износостойкости и прочности, в связи с чем, исследования влияния низких температур на свойства металлов представляют важное значение в контексте современных технологий и инженерных применений [1]. Одним из ключевых аспектов, требующих углублённого рассмотрения, является сдвиг ниже нуля точки окончания мартенситного превращения у легированных и высокоуглеродистых сталей после возвращения к нормальным эксплуатационным условиям. Следует отметить, что повышенное содержание углерода может быть обусловлено как процессом цементации, так и легированием сталей. Процентное содержание углерода и легирующих элементов напрямую влияет на температурные параметры закалки: увеличение содержания углерода выше 1 % и легирующих элементов может привести к снижению температуры около 25-45 °С на каждый процент содержания добавок [1, 2]. Следовательно, определение оптимального баланса между углеродом и легирующими элементами имеет существенное значение для процессов термической обработки металлов. Некоторые виды сталей могут обладать способностью претерпевать полное превращение аустенита в мартенсит при экстремально низких температурах, что также требует дополнительного изучения и понимания механизмов происходящих процессов.

Исследования по воздействию низких температур на металлы имеют значимость не только на практическом уровне, но и в рамках теоретических исследований [2-4]. Глубокое понимание изменений в структуре и свойствах металлов при экстремальных температурах позволяет разрабатывать новые технологии обработки материалов, уникальные сплавы с улучшенными механическими и физическими характеристиками. Дополнительно, анализ воздействия низких температур на металлы актуален в контексте разработки материалов для применения в космической и авиационной промышленности, где металлы подвергаются экстремальным условиям окружающей среды [5-7]. Поэтому системное изучение поведения металлов при низких температурах имеет стратегическое значение для создания высокопрочных и надёжных материалов для различных отраслей промышленности.

Таким образом, исследование фазового состава металлов в криогенном диапазоне температур становится актуальной задачей.

## 2 Материалы и методы

Применение метода криогенно-эрозионного упрочнения и легирования представляет собой эффективный метод повышения прочности, который не требует нанесения дополнительных защитных покрытий [8-10]. Этот процесс имеет особое значение при обработке медицинских инструментов, где крайне нежелательно наличие мельчайших частиц упрочняющего металла, способных отделиться и попасть в раны пациентов. Кроме того, помимо повышения прочности, данный метод позволяет устранить микродефекты на поверхности, где могут развиваться патогенные микроорганизмы, что особенно важно в медицинской сфере. Исследования показывают, что химические соединения, образующиеся в результате вышеуказанного процесса, образуют прочные связи с материалом детали [11-13], «залечивая» трещины и микродефекты, что позволяет достичь вышеуказанной цели.

В процессе криогенно-эрозионного упрочнения важными этапами являются создание жидкой плёнки на поверхности, включение тока, а также регулирование подачи жидкого газа в

начальный момент возникновения импульса тока. Однако следует отметить некоторые недостатки данного метода, такие как затруднения в наблюдении за областью упрочнения и контроле качества поверхностного слоя из-за образования газожидкостной смеси и выведения твёрдых частиц материала с упроченной поверхности, а также значительный расход сжиженного газа [2, 3].

Процесс упрочнения медицинских инструментов с использованием электроэрозионного метода представляет собой сложную и тщательно отлаженную процедуру, требующую точной настройки оборудования и строгого контроля параметров. Настроив установку для электроэрозионного упрочнения с помощью программирования и расположив медицинский инструмент на рабочей поверхности, осуществляется процесс подачи жидкого азота, что позволяет снизить температуру электрода и инструмента до уровня, необходимого для стабильной обработки.

Строго регулируя параметры процесса, такие как сила тока и подача жидкого азота, специалисты обеспечивают безопасность, эффективность и стабильность процесса упрочнения, минимизируя риск повреждения кромки инструмента разрядами. Для предотвращения возможного повреждения кромки инструмента разрядами осуществляют смещение оси электрода-инструмента (ЭИ) в процессе упрочнения, что позволяет равномерно распределять воздействие и минимизировать риск деформации или повреждения режущей кромки [14-16].

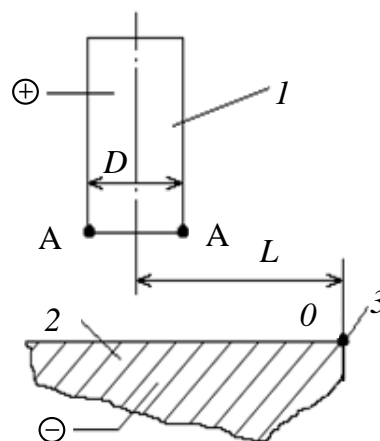
Таким образом, тщательное планирование, контроль параметров и проведение соответствующих мероприятий позволяют обеспечить успешное и качественное упрочнение медицинских инструментов с использованием электроэрозионного метода без нежелательных последствий для их функциональности и долговечности.

### 3 Результаты исследований

Граничным условием для того, чтобы произошло упрочнение обрабатываемой детали без её разрушения является температура обработки ( $T$ ), которая должна быть больше 1000 К (начало формирования нитрида титана ( $T_0$ )), но меньше температуры плавления ( $T_{пл}$ ) материала заготовки [1], которая для стали составляет приблизительно 1700 К, т. е.

$$T_0 < T < T_{пл}.$$

Для упрочнения инструмента при использовании метода электроэрозии возникает опасность повреждения режущей кромки разрядами. Чтобы избежать этого, требуется сдвигать ось ЭИ на определённое расстояние  $L$  (рис. 1).



1 – электрод-инструмент; 2 – упрочняемая деталь; 3 – режущая кромка

Рисунок 1 – Схема смещения оси электрода относительно режущей кромки инструмента

По [1, 17, 18] смещение точки обработки  $O$  должно быть равным сумме радиуса ЭИ ( $R$ ) и среднего арифметического радиусов изотерм, ограничивающих формирование нитрида титана и плавление заготовки ( $R_o$  и  $R_T$  соответственно):

$$L = R + \left( \frac{R_o + R_T}{2} \right). \quad (1)$$

Известно [1, 19, 20], что при соблюдении условий, когда температура окружающей среды совпадает с температурой жидкого азота, достигается результат, показанный в формулах:

$$R_o = K_3 \sqrt[3]{\frac{Q \cdot \eta_u \cdot A_u}{C_3 \cdot \rho_3 (T_o - T)}}, \quad (2)$$

$$R_T = K_3 \sqrt[3]{\frac{Q \cdot \eta_u \cdot A_u}{C_3 \cdot \rho_3 (T_{nl} - T)}}, \quad (3)$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий перераспределение энергии между электродом и заготовкой, для случая с жидким азотом  $K = 0,28 \dots 0,33$ ;  $C_3$  – теплоёмкость материала, Дж/(кг·К);  $Q$  – безразмерный коэффициент, учитывающий свойства материала электрода и длительность импульса:

$$Q = e^{-\frac{1}{32\pi\sqrt{\pi F_0}}}, \quad (4)$$

где  $F_0$  - критерий Фурье, определяемый по выражению:

$$F_0 = \frac{\bar{\alpha} \cdot \tau_u}{R^2}, \quad (5)$$

где  $\tau_u$  – время протекания электрического разряда, с;

$R$  – текущий радиус, мм, который равен радиусам изотерм (2) и (3) для выражений (4) и (5);  $\bar{\alpha}$  - теплопроводность материала электрода, Дж/(с·мм);

$\eta_u$  – КПД импульса, определяется по выражению:

$$\eta_u = (1 - K_1) \cdot (1 - K_2) \cdot (1 - K_3) \cdot (1 - K_4), \quad (6)$$

где  $K_1, K_2, K_3, K_4$  – коэффициенты потерь энергии.

Расчёты показывают, что  $\eta_u = 0,28 \dots 0,3$ , что в 1,5 раза ниже, чем при электроэрозионной обработке (ЭЭО) в среде керосина;

Энергия импульса  $A_u$  для генераторов, работающих по RC-схеме, Дж:

$$A_u = \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (7)$$

где  $C$  – ёмкость конденсаторов, мкФ;  $U$  – напряжение пробоя между ЭИ и обрабатываемой поверхностью, В.

Таким образом, становится возможным определить расстояние, определяющее положение ЭИ относительно зоны обработки, что позволяет обеспечить необходимое качество процесса.

Для обработки криогенно-эрозионным способом применяют ЭИ в виде иглы или проволоки со скруглением рабочей части  $D$ . Пример конструкции такого инструмента приведён на рис. 2.

Известно [21], что величину износа ЭИ можно оценить, как отношение уменьшения его массы или объёма к времени обработки. Объем, в свою очередь, по [22] можно оценить зависимостью:

$$\bar{V} = \frac{1}{12} \pi \cdot D^2 \cdot H, \quad (8)$$

где  $H$  – высота профильной части ЭИ (см. рис. 2), мм.

Объем нанесённого покрытия можно оценить как произведение ширины слоя  $b$  на толщину  $h$  и его длину  $l$ :

$$\bar{V} = b \cdot h \cdot l, \quad (9)$$

при этом

$$l = f(\tau). \quad (10)$$

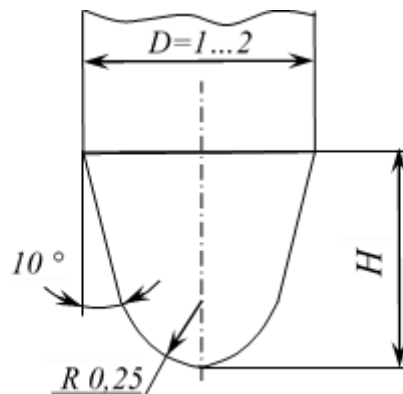


Рисунок 2 – Форма электрода-инструмента

Для постоянной скорости обработки  $V$  её время  $\tau$  вычисляется по формуле, с:

$$\tau = \frac{1}{V}, \quad (11)$$

Чтобы определить диаметр проволоки для обработки в воздушной среде, необходимо из формулы (8) выразить  $D$  и подставить туда значения из формул (10) и (11):

$$D = \sqrt{\frac{12 \cdot b \cdot h \cdot V \cdot \tau}{\pi \cdot H}}. \quad (12)$$

Опытным путём было установлено, что износ ЭИ в среде жидкого азота снижается в 4 раза по сравнению с обработкой в воздушной среде. Тогда формулу (12) можно скорректировать для криогенно-эрозионной обработки:

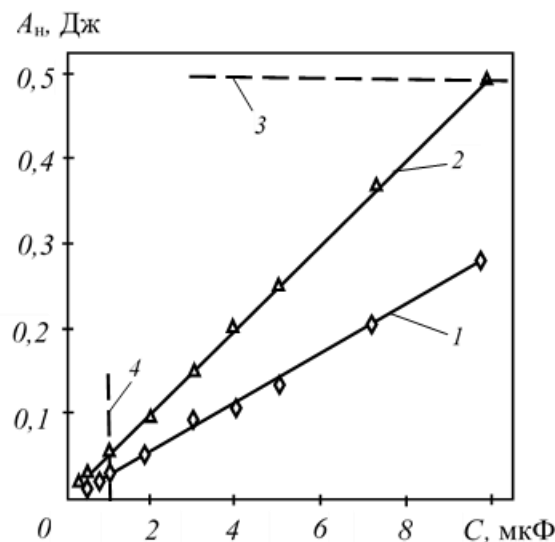
$$D = \sqrt{\frac{3 \cdot b \cdot h \cdot V \cdot \tau}{4 \cdot \pi \cdot H}}. \quad (13)$$

Значения  $b$  и  $h$  определяются путём эксперимента,  $V$  и  $\tau$  рассчитываются. В результате оптимальные параметры рабочей части ЭИ определяются соотношениями:

$$D = (0,1 \dots 0,12) H \quad \text{или} \quad H = (10 \dots 12) D. \quad (14)$$

Формула (14) применяется при первичной обработке режущей кромки, где поддержание оптимальной геометрии ЭИ является необходимым для предотвращения повреждений кромки.

По экспериментальным данным была построена номограмма, которая позволяет управлять процессом криогенно-эрозионного упрочнения (рис. 3).



1, 2 – энергия импульса  $A_{и}$  при  $U = 80$  и  $100$  В;  
 3 – граница формирования нитрида титана; 4 – граница устойчивого процесса

Рисунок 3 – Режимы криогенно-эрозионной обработки стали Р9 с использованием многоконтурного генератора

Таким образом, подбирая требуемое значение энергии импульса, можно достигнуть оптимального соотношения производительности и качества обрабатываемой поверхности.

#### 4 Обсуждение и заключение

Упрочнение кромки режущих инструментов в медицинской технике привело к значительному прогрессу в развитии этой технологии, продемонстрировав положительные результаты. Чтобы провести эксперимент отобрали четыре скальпеля из партии, каждый из которых пронумеровали от 1 до 4. Два из них подвергли процессу упрочнения с использованием титанового сплава ОТ4-1 в сфере жидкого азота. Режим обработки включал в себя: ток примерно 0,2 А, подачу до 30 мм/с и расход жидкого азота примерно 0,2 л/мин.

Результаты исследований показали существенное увеличение долговечности режущих кромок между заточками благодаря процедуре упрочнения.



Скальпель передали в медицинское учреждение для фактического использования в ходе операций. В процессе циклов многократной стерилизации, которые сопровождались изучением состояния инструментов, были выявлены существенные различия между упрочнёнными и неупрочнёнными образцами.

Результат люминесцентного контроля показал, что после проведения 10 циклов стерилизации количество и распространение микротрещин на неупрочнённом скальпеле значительно возросли с образованием дефектов на его режущей части. В то же время упрочнённый скальпель не демонстрировал наличие микротрещин или признаков затупления, а также не претерпевал изменений во внешнем виде или характеристиках режущей части в процессе стерилизации.

Долгосрочные испытания подтвердили более чем десятикратное увеличение эффективности после процедуры упрочнения. Полученные результаты исследования подтвердили не только эффективность, но и экономическую обоснованность использования данного метода в медицинской практике.

### Список литературы

- 1 Справочник технолога (справочное издание) / под. ред. Сулова 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. – 249 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. – С. 24-32
- 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. – с. 256
- 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 проволочно-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. Летагин// 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](https://doi.org/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/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 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. // M.: Innovative mechanical engineering, 2019. 800 p.
- 2 Smolentsev E.V. Design of electrical and combined processing methods M.: 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. Shirokozukhova, 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. Shirokozukhova, 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/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 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.

© Сухоруков В. Н., Куц В. В., Милинчук К. А., Смоленцев Е. В., 2024