

DOI: 10.34220/2311-8873-2022-29-36



УДК: 621.9

2.5.6 – технология машиностроения

БЕЗАБРАЗИВНАЯ ЧИСТОВАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ МАШИН КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

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

Золототрубова Юлия Сергеевна
старший преподаватель кафедры графики,
компьютерного проектирования и дизайна,
Воронежский государственный технический
университет, г. Воронеж, РФ

Грицюк Василий Григорьевич
заведующий кафедрой технологии
машиностроения, к.т.н., Воронежский
государственный технический
университет, г. Воронеж, РФ

Ковалев Сергей Викторович
директор АО "КБХА", кандидат
технических наук, г. Воронеж, РФ

Аннотация.

Для расширения возможностей проектирования технологических процессов чистовой обработки деталей запорной арматуры в ряде случаев целесообразно использовать возможности варьирования различных воздействий в едином комбинированном методе с наложением электромагнитного поля. Обоснованное сочетание физических воздействий позволяет обеспечить необходимые конструктивные параметры, достаточную производительность и повышение ресурса готовых изделий.

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОЭРОЗИЯ, ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ.

NON-ABRASIVE FINISHING OF MACHINE PARTS BY COMBINED METHODS

✉¹**Smolentsev Evgeniy Vladislavovich**
doctor of tech. sc., professor,
department «Engineering Technology»,
Voronezh State Technical University,
Voronezh, RF
e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

Zolototrubova Yulia Sergeevna
assistant professor, department
of Graphics, Computer Engineering
and Design Voronezh State Technical
University, Voronezh, RF

Gritsyuk Vasily Grigorievich
head of the department
«Engineering Technology»,
cand. of tech. sc., Voronezh State
Technical University, Voronezh, RF

Kovalev Sergey Viktorovich
director of JSC "KBHA", candidate
of technical sciences, Voronezh, RF

Annotation.

In order to expand the possibilities of designing technological processes for finishing shut-off valve parts, in some cases it is advisable to use the possibilities of varying various influences in a single combined method with the imposition of an electromagnetic field. A reasonable combination of physical influences allows us to provide the necessary design parameters, sufficient productivity and an increase in the resource of finished products.

Keywords: ELECTROEROSION, ELECTROCHEMICAL TREATMENT, TECHNOLOGICAL PARAMETERS.

¹Автор для ведения переписки

1 Состояние исследования и актуальность работы

Запорная арматура предназначена для регулировки подачи жидких и газовых сред и широко используется в самых различных областях машиностроения. Шибберные, клиновые задвижки, клапаны и дроссельные устройства могут использоваться в добывающей промышленности, авиакосмической отрасли, транспортном машиностроении и других областях. Условия эксплуатации запорной арматуры могут быть самыми разнообразными, в том числе, данные узлы должны надежно работать в условиях как сверхнизких, так и сверхвысоких температур, выдерживать высокое давление протекающих через них сред, в том числе, и агрессивных. В случае утечки последних последствия могут быть катастрофическими и для окружающей среды, и для техники и персонала, и даже, в случае космического запуска – для престижа в масштабах государства. Таким образом, обеспечение рабочих характеристик запорной арматуры является важной задачей для производства. Достижение герметичности в местах сопряжений металлических деталей возможно, если обеспечить необходимую точность изготовления и шероховатость. Для этого традиционно используют абразивную обработку, обеспечивающую заданные конструктивные значения. Недостатком данного подхода является то, что абразивные зерна инструмента в процессе формообразования деталей могут оставаться в получаемом поверхностном слое и в дальнейшей эксплуатации будут вызывать повышенное трение и износ в запорных устройствах. Таким образом, данное явление нежелательно, снижает ресурс и надежность получаемых изделий. Решение задачи по поиску новых способов обработки, не снижающих срок службы изделий при обеспечении необходимых конструктивных параметров с обеспечением производительности, сопоставимой с абразивной обработкой, можно считать актуальным.

Целью работы является поиск оптимального сочетания физических воздействий в едином комбинированном технологическом процессе изготовления и ремонта запорной арматуры с предельно минимальными зазорами в регулирующих механизмах.

2 Материалы и методы

В качестве альтернативы абразивной обработке ранее в исследованиях предпринимались неоднократные попытки использовать электрофизикохимические методы обработки, которые основаны на бесконтактном воздействии на обрабатываемую поверхность [1-4]. За счет комбинации различных методов можно достичь формирования необходимой геометрии и шероховатости поверхности с заданными свойствами. Несмотря на успехи ученых-исследователей по данному направлению, абразивная обработка пока имеет следующие решающие преимущества: сравнительная простота средств технологического оснащения, их распространенность и доступность, технологический процесс давно известен и изучен, и обладает высокой производительностью. Таким образом, одним из методов достижения поставленной в работе цели является поиск и разработка комбинации воздействий без использования абразива, обеспечивающих требуемое качество обработки и её производительность.

3 Результаты исследований

Как показали проведенные исследования, оптимальное соотношение производительности и точности обработки дает комбинация электроэрозионной и электрохимической обработок [5-8]. Съем металла с заготовки происходит одновременно за счет воздействия электрическими разрядами от эрозионной составляющей процесса и от анодного растворения. При этом отсутствует непосредственный контакт между инструментом и обрабатываемой поверхностью. Воздействие электроэрозионно-химической обработки на формируемую поверхность проявляется в виде наводораживания в результате разложения электролита, локальных зон термического влияния, растворения связки по границам зерен металла. Все это может оказать негативный эффект на эксплуатационные характеристики готовых изделий.

Известно, что электроэрозионную обработку (ЭЭО) можно вести по прямой или обратной схеме [2]. При прямой схеме достигается необходимое для данного случая качество поверхностного слоя, но снижается производительность. Таким образом, электроискровую обработку при пря-

мой полярности используют для чистовых операций или в том случае, когда необходимо удалить небольшой объем материала. При обратной схеме заготовку обрабатывают импульсами более высокой мощности, поэтому в зависимости от этого и времени протекания процесса термическое расширение металла происходит с разной скоростью, что также зависит от глубины проникновения подводимого тепла [9]. Перепад температур в момент протекания импульсного воздействия может превышать 2500 К, что сопровождается высоким давлением от образования газовых пузырей в межэлектродном пространстве (P_{pc}) (рис. 1). В результате становится высокой вероятностью возникновения внутренних напряжений и микротрещин [10, 11]. Если обработка ведется в жидкой среде, то после разряда происходит дальнейшее резкое охлаждение поверхности заготовки, что вновь повышает напряжения и трещинообразование. На рисунке 1 изображено формирование слоя металла после обработки детали электроэрозионной обработкой [12]. Если обозначить общую глубину поверхностной трещины как H , то она будет складываться из величин двух участков, обозначенных на рисунке как h_1 и h_2 . Если на верхнем участке расхождение краев трещины достаточно велико, то на нижнем, ближе к устью концентратора, расстояние такое, что наблюдается межмолекулярное воздействие (P_δ) между ее сторонами. В результате на участке h_2 могут наблюдаться сжимающие силы. В случае попадания рабочей среды в микротрещину может происходить снижение сжимающих сил и ее расклинивание с разрушением связей межкублитной решетки. Количество свободной энергии E_δ наноразмерных резистивных пленок, обратно пропорциональное значению толщины вышеуказанной пленки δ_n , – результат расклинивающей силы $P_\delta = -dE_\delta/d\delta_n$, всегда противодействующей уменьшению толщины пленки и уравновешиваемой внешними силами [1, 13]. В результате, по обратной (электроимпульсной) схеме можно получить достаточно высокую производительность, но толщина измененного слоя будет превышать высоту микронеровностей в несколько раз (до 0,4 мм у сталей). Таким образом, данную схему можно применять только на черновых операциях при обработке деталей запорных устройств.

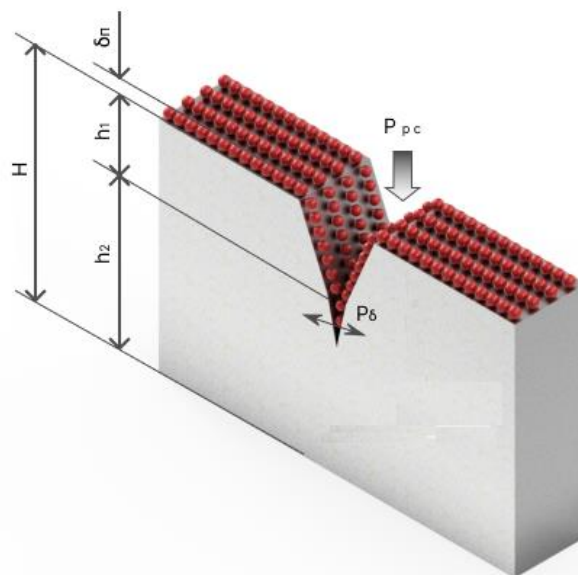
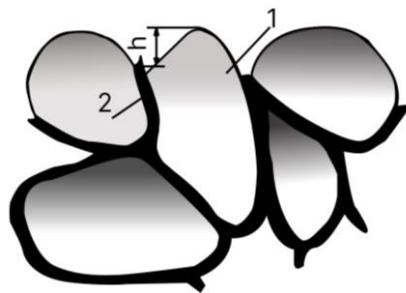


Рисунок 1 – Обработанная поверхность с микро (нано) трещиной

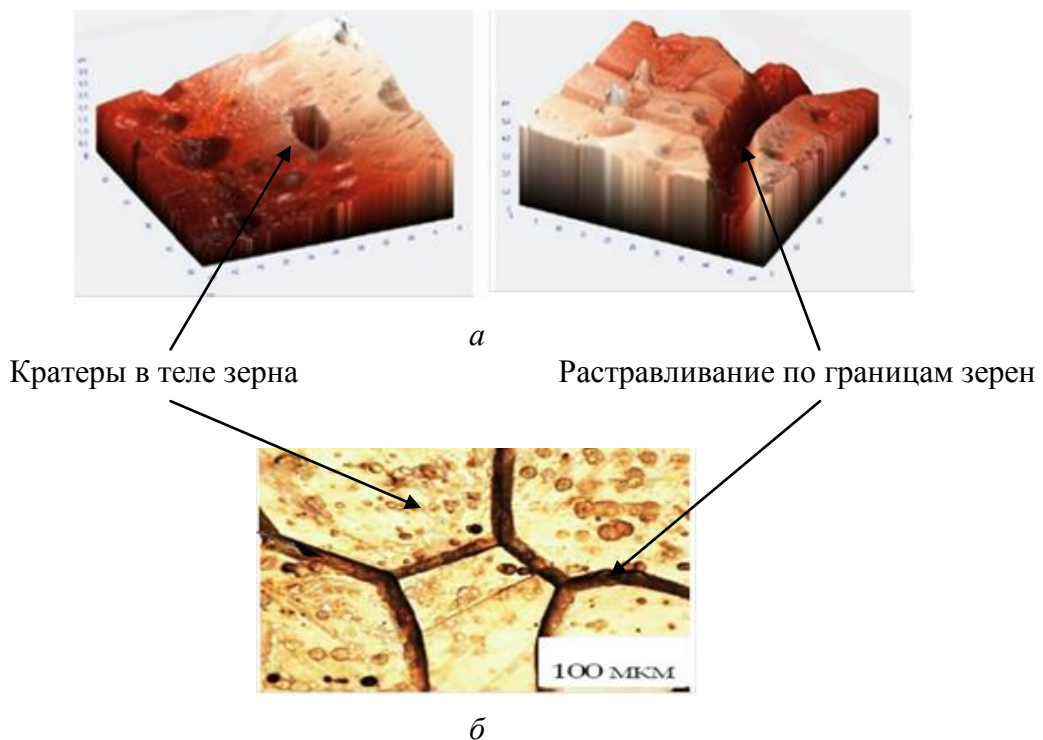
Еще одним вариантом достижения поставленной в данной работе цели является использование электрохимической размерной обработки (ЭХРО). Анодное растворение металла заготовки, лежащее в основе данного метода, позволяет простым поступательным движением электрода-инструмента получать геометрию высокой сложности и точности, в сущности, реализуя чистовую и черновую операции за один переход. При ЭХРО катод-инструмент при расчетных режимах не изнашивается, что также способствует достижению заданных конструкторами допусков, при этом, в отличие от ЭЭО, можно с необходимой точностью обработать труднодоступные элементы. Научно обоснованное управление процессом элек-

трохимической обработки позволяет формировать необходимые характеристики поверхностного слоя заготовки, в том числе и шероховатость. Параметрами, через которые можно варьировать результаты обработки, при ЭХРО могут быть скорость прокачки электролита, его химический состав, подогрев или охлаждение зоны формообразования. В зависимости от их величин и соотношений результаты формообразования микро- и макрогеометрии могут быть самыми разнообразными. При небольших размерах поликристаллов металла проще получить приемлемую шероховатость, так как процесс растворения идет по их границам (рис. 2). С увеличением вышеупомянутых размеров необходимо увеличивать и количество заряда в единицу времени, которое протекает через единицу площади выбранного поперечного сечения (т.е. плотность электрического тока). Если использование традиционной ЭХРО не всегда может обеспечить необходимую плотность, то комбинация с добавлением электроэрозионной обработки дает такую возможность (рис. 3) [5]. Электроэрозионно-химическая обработка (ЭЭХО), кроме того, позволяет повысить производительность при сохранении заданных качественных показателей.



1 – зерно материала; *2* – связка между зёрнами;
h – формируемая после обработки величина шероховатости

Рисунок 2 – Формирование микрогеометрии при электрохимической обработке



a – 500-кратное увеличение; *б* – трёхмерный рельеф поверхности площадью 50 мкм × 50 мкм

Рисунок 3 – Микрогеометрия поверхности стали ЭИ696 после комбинированной электроэрозионно-химической обработки

На рисунке 4 приведена зависимость высоты микронеровности детали из сплава ХН55ВМТФКЮ (ЭИ929) после ЭХО от силы электрического тока, протекающего через элемент поверхности единичной площади при различной температуре рабочей среды [12, 13]. Если электрический ток подавать импульсами, то плотность тока повышается, что снижает в итоге шероховатость после обработки до 25 % по сравнению с обычной схемой. Некоторые виды термообработки приводят к тому, что размеры зерна увеличиваются и при межкристаллитном травлении при небольших скоростях прокачки рабочей жидкости (до 7 метров в секунду) и при величине кислотности рН более 11, что в итоге это приводит к существенному росту шероховатости.

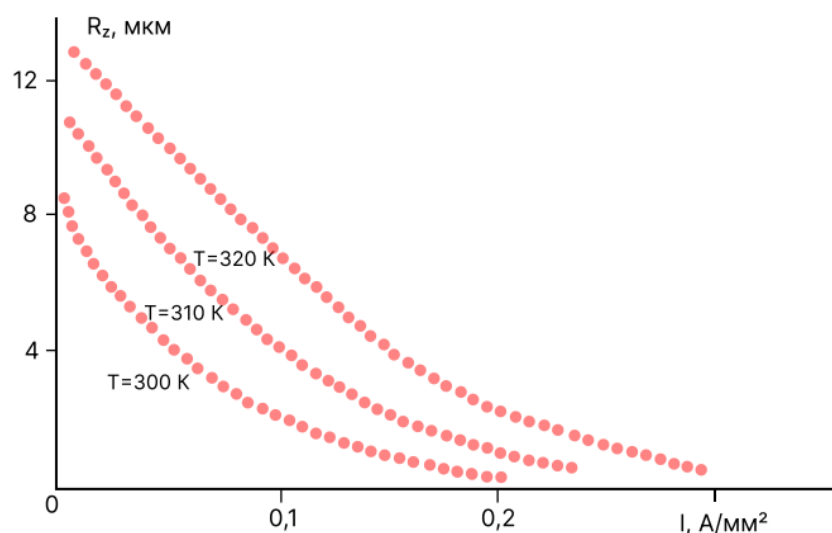


Рисунок 4 – Зависимость шероховатости материала ХН55ВМТФКЮ от плотности тока при различной температуре рабочей среды

В таблице 1 приведены значения шероховатости после электрохимической обработки для различных материалов.

Таблица 1 – Режимы ЭХО и получаемая шероховатость поверхности

Материал	Электролит			Плотность тока, А/мм²	Шероховатость после ЭХО Ra, мкм
	Состав, %	Температура, К	Скорость, мм/с		
40ХНМА, 30ХГСА, ОХНЗМФА	NaCl – 11 + NaNO ₂ – 0,03	292	10-12	0,13-0,15	0,63-0,32
АВТ1	NaNO ₃ – 11	293	10-12	0,14-0,16	0,63-0,32
ВТЗ-1	NaCl – 11 + KBr – 3	313-323	13-15	0,18-0,20	1,25-0,63
ХН70МВТЮБ	NaCl – 12	293	12-13	0,15-0,20	1,25-0,63

Результаты исследований, приведенные в таблице 1, показывают, что водные растворы солей на основе хлорида натрия позволяют достичь необходимых значений для всех распространенных конструкционных материалов [2].

Использование ЭХО не приводит к декарбонизации, появлению наклепа, прижогов и уменьшению микротвердости в слое заготовки, чего нельзя сказать о ЭЭО или лезвийной обра-

ботке [14-20]. Это положительно сказывается на ресурсе работы деталей машин, так как повышается предел выносливости материала при многоцикловых нагружениях. Таким образом, целесообразно использовать электрохимическую обработку как чистовую после вышеупомянутых методов, достигая нивелирования их отрицательных последствий. Даже в тех случаях, когда заготовка выполнена из материала, склонного к растрескиванию, снижение предела выносливости достигает достаточно незначительных величин, укладываемых в допуски.

Для того, чтобы избежать повышения хрупкости и снижения предела выносливости, которые появляются от насыщения поверхностного слоя водородом из рабочей среды, необходимо предпринимать меры по улучшению условий прокатки электролита [1].

Показатели, которые обеспечивают ЭХО зависят от пропорции влияния термического воздействия при ЭХО и химического от анодного растворения в процессе ЭХО. По простоте комбинированного процесса при чистовых режимах шероховатость обработанных поверхностей, как правило, пребывает в пределах $Ra = 0,32-0,63$ мкм [1], что гарантирует достаточно высокие эксплуатационные характеристики изделий.

4 Обсуждение и заключение

Обоснование сочетаний электроэрозионной и электрохимической обработок для проектирования технологического процесса изготовления запорной арматуры позволяет перейти к дальнейшему его практическому воплощению. Следующим этапом исследований будет обоснование возможности комбинированной чистовой обработки при низких напряжениях за счет снижения межэлектродного зазора до минимальной величины, что позволит достичь необходимых параметров без использования сложных систем контроля за относительными движениями инструмента и детали, обеспечить необходимые конструктивные и технологические параметры.

Список литературы

- 1 Смоленцев, Е. В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М. Машиностроение. 2005. – 511 с.
- 2 Сулима, А. М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А. М. Сулима, М. И. Евстигнеев. М. : Машиностроение, 1974.
- 3 Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. В 2 т. / Под ред. В. П. Смоленцева. М : Высшая школа, 1983.
- 4 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.
- 5 Абляз, Т. Р. Применение электродов-инструментов с покрытием для электроэрозионной обработки стали 38Х2Н2МА / Т. Р. Абляз, Е. С. Шлыков, С. С. Кремлев // СТИН. – 2017. – № 5. – С. 20 -21.
- 6 Комбинированные методы обработки / В. П. Смоленцев, А. И. Болдырев, А. В. Кузовкин, Г. П. Смоленцев, А. И. Часовских. Воронеж : ВГТУ, 1996. – 168 с.
- 7 Смоленцев, В. П. Влияние электрохимической размерной обработки на физико-механические характеристики металлов // Электрохимическая обработка металлов. Сб. науч. тр. Кишинев: "Штиинца", 1972.
- 8 Справочник технолога (справочное издание) / под. ред. Сулова А. Г. // М. : Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
- 9 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.
- 10 Абляз, Т. Н. 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 Obtaining 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 №. 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.

References

1 Smolentsev, E. V. Design of electrical and combined processing methods. M. Engineering. 2005. – 511 p.

2 Sulima, A. M. Quality of the surface layer and fatigue strength of parts from heat-resistant and titanium alloys / A. M. Sulima, M. I. Evstigneev. M. : Mashinostroenie, 1974.

3 Electrophysical and electrochemical methods of material processing. In 2 volumes / Ed. V. P. Smolentsev. M : Higher School, 1983.

4 Ablyaz, T. R. Study of changes in the properties of electrodes depending on the modes of wire-cut electroerosive processing // Bulletin of PSTU. Mechanical engineering, materials science. – 2011. – Т. 13. – № 1. – P. 87-93.

5 Ablyaz, T. P. Application of coated tool electrodes for electroerosive machining of steel 38Kh2N2MA / T. P. Ablyaz, E. S. Shlykov, S. S. Kremlev // STIN. – 2017. – № 5. – P. 20-21.

6 Combined processing methods / V. P. Smolentsev, A. I. Boldyrev, A. V. Kuzovkin, G. P. Smolentsev, A. I. Chasovskikh. Voronezh : VSTU, 1996. – 168 p.

7 Smolentsev, V. P. Influence of electrochemical dimensional processing on the physical and mechanical characteristics of metals // Electrochemical processing of metals. Sat. scientific tr. Chisinau: "Shtiintsa", 1972.

8 Handbook of the technologist (reference edition) / under. ed. Suslova A. G. // M. : Innovative engineering, 2019. – 800 p.

9 Status and prospects for the 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. – № 2 (41). – P. 5-9.

10 Ablyaz, T. N. Empirical modeling of the interelectrode during electroerosive machining of steel 38X2N2MA / T. N. Ablyaz, E. S. Shlykov, D. A. Borisov, A. A. Shumkov, I. Yu. Letyagin // Bulletin of the Perm National Research polytechnic university. Mechanical engineering, materials science. – 2017. – Т. 19. – № 2. – P. 67-79.

11 Kuts, V. V. Study of the process of making holes with a hollow electrode on a modernized CNC EDM machine / V. V. Kuts, M. S. Razumov, D. A. Zubkov, A. S. Byshkin, A. A. Nestruev // News of the Tula State University. Technical science. 2020. – № 3. – P. 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, Yuhnevich 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 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 Uman 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.

© Смоленцев Е.В., Золототрубова Ю.С., Грицюк В.Г., Ковалев С.В., 2022