

**ROBOTIZATION OF PROCESS OF ELECTRIC-DISCHARGE MACHINING
OF HOLES IN HIGH PRESSURE TURBINE BLADES***Marat Rinatovich Khabibullin ^a, Sergei Igorevich Fetsak*

Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia

^a habibullin.2001yandex.ru

ABSTRACT

This investigation provides problems of electrical discharge machining within aero-engine manufacturing industry. Common issues in serial process are significant tool-electrode wear, forming the recast layer, changing geometry of tool side surface and relatively low process performance. Among these the relatively low performance is the most economically significant. An automation of electrical discharge machining using a robotic complex is proposed applying five electrical discharge machine tools including die-sinking machine and hole drilling machine. The optimal configuration is based on simulation modelling results aiming most equal load ratio across machine tools. Machine tools were selected based on requirements for productivity and accuracy. A system of quick-release automated fastening and a system for linear displacement of the manipulator robot were developed to service the machine tools. Designed robotic complex has a significant increased productivity and reduced requiring number of production stuff needed for five machine tools.

KEYWORDS

Electrical discharge machining; perforation arrays; robotization of process.

**РОБОТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ
ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ***Марат Ринатович Хабибуллин ^a, Сергей Игоревич Фецак*

Уфимский университет науки и технологий, Россия, Республика Башкортостан, 450076 Уфа, ул. Заки Валиди, 32

^a habibullin.2001yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены проблемы, присущие электроэрозионной обработке в авиадвигательной отрасли. Выявлены такие распространенные проблемы серийной технологии, как значительный износ электрод-инструмента, формирование измененного (дефектного) слоя, изменение торцевой поверхности инструмента и относительно низкая производительность обработки. Среди них наиболее экономически значимой является относительно низкая про-

изводительность. Выдвинуто предложение по роботизации электроэрозионной обработки для сокращения времени на вспомогательные операции. Предложены две компоновки робототехнического комплекса, включающего пять единиц технологического оборудования, в том числе копировально-прошивные станки и станки типа супердрель и один робот-манипулятор. По результатам имитационного моделирования определена оптимальная компоновка с наиболее равномерной загрузкой технологического оборудования. Подобрано технологическое оборудование, исходя из требований по производительности и точности. Для обслуживания технологического оборудования разработана система быстросъемной автоматизированной оснастки и система линейных перемещений робота-манипулятора. Полученная схема робототехнического комплекса позволила существенно повысить производительность и сократить число производственных рабочих, необходимого для обслуживания пяти единиц технологического оборудования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Электроэрозионная обработка; ряды перфораций; роботизация технологического процесса.

Введение

На текущий момент в авиадвигателестроении электроэрозионная обработка (ЭЭО) занимает около 7% от всех операций механической обработки деталей, и ее доля продолжает расти. Данный метод позволяет обрабатывать даже труднообрабатываемые материалы, такие как жаропрочные никелевые сплавы. Актуальность повышения производительности технологического процесса обработки первой ступени турбины высокого давления (ТВД) и других деталей и сборочных единиц, входящих в горячую часть газотурбинного двигателя, подчеркивается возрастающим объемом заказов и национальной политикой роботизации машиностроительного комплекса экономики [1–8].

Для исследования потенциала роботизации технологического процесса (ТП) ЭЭО выбрана деталь-имитатор рабочий лопатки ТВД, обладающей всеми типами отверстий перфорации, приведенными на рис. 1. Деталь-имитатор рабочей лопатки первой ступени ТВД (рис. 2) обладает всеми конструктивными элементами, приведенными на рис. 1.

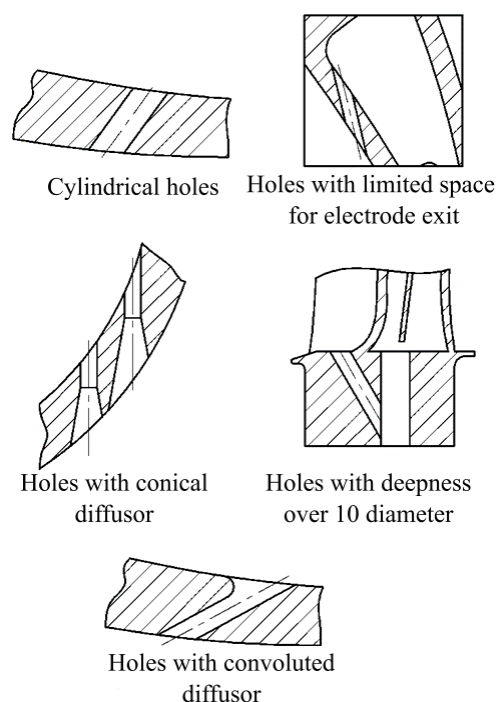


Рис. 1. Типы отверстий перфорации

Fig. 1. Perforation holes types

Анализ литературы [9–17] и производства на предприятиях выявил следующие проблемы:

1. Значительный износ трубчатого электрод-инструмента (ТЭИ) – до 200% относительно снятого материала.

2. Формирование измененного (дефектного) слоя.

3. Изменение формы электрод-инструмента и, как следствие, конусность получаемых отверстий.

4. Относительно низкая производительность обработки единичным электрод-инструментом на станках типа супердрель.

Патентный поиск [18–20] выявил разработки в области роботизации электроэрозионной обработки. Это говорит о востребованности дальнейшей автоматизации данного технологического процесса в целом и интерес к ней со стороны производителей оборудования ввиду спроса со стороны потребителей электроэрозионной оборудования.

Проблема невысокой производительности может быть решена комбинированием обработки единичным ТЭИ и гребенчатым электрод-инструментом (ГЭИ), которым возможно изготовление ряда соосных отверстий диаметром 0,3–4,0 мм за один проход.

В табл. 1 приведен результат анализа состава отверстий детали-имитатора. Общее число отверстий 110, из которых в составе

соосных рядов перфорации 71 (65%), а несоосных – 39 (35%). В среднем на изготовления одного отверстия на станке типа супердрель с рабочей подачей 1,0–1,5 мм/с затрачивается 1 мин машинного времени.

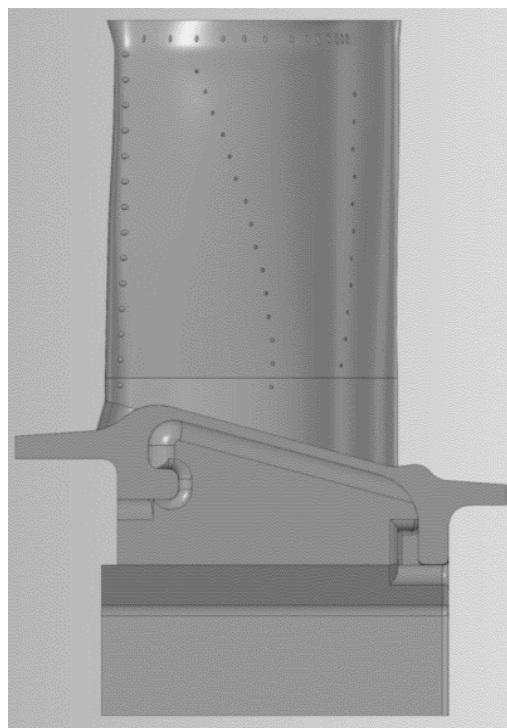


Рис. 2. Деталь-имитатор рабочей лопасти

Fig. 2. Rotor blade imitator

Таблица 1. Расчет машинного времени на изготовление рядов отверстий

Table 1. Estimation of holes series machining time

№ ряда / Series No.	Геометрия ряда / Series geometry	Диаметр, мм / Diameter, mm	Число отверстий / Holes amount	Операционное время, мин / Machining time, min
1	Соосный / coaxial	0,55	13	13
2	Соосный / coaxial	0,55	14	14
3	Соосный / coaxial	0,55	14	14
4	Несоосный / non-coaxial	0,4	15	15
5	Несоосный / non-coaxial	0,4	11	11
6	Соосный / coaxial	0,3	30	30
7	Несоосный / non-coaxial	0,3	12	12
8	Несоосный / non-coaxial	0,6	1	1

1. Техничко-экономическое обоснование эффективности

Для реализации параллельной обработки нескольких заготовок спроектирована компоновка робототехнического комплекса (РК) (рис. 3). В РК входит три станка типа супердрель и два копировально-прошивных станках. Робот-манипулятор с двойным захватным устройством перемещает заготовки,

закрепленные в оснастке. Исходная схема обработки предполагает ручное закрепление и снятие заготовок в станках типа супердрель. Циклограммы на рис. 4 и 5 демонстрируют, что при сокращении затрат вспомогательного времени до $t_{всп} = 1$ мин на смену заготовок в технологическом оборудовании новый ТП повышает загрузку станков типа супердрель до 97%, а копировально-прошивных станков до 91%.

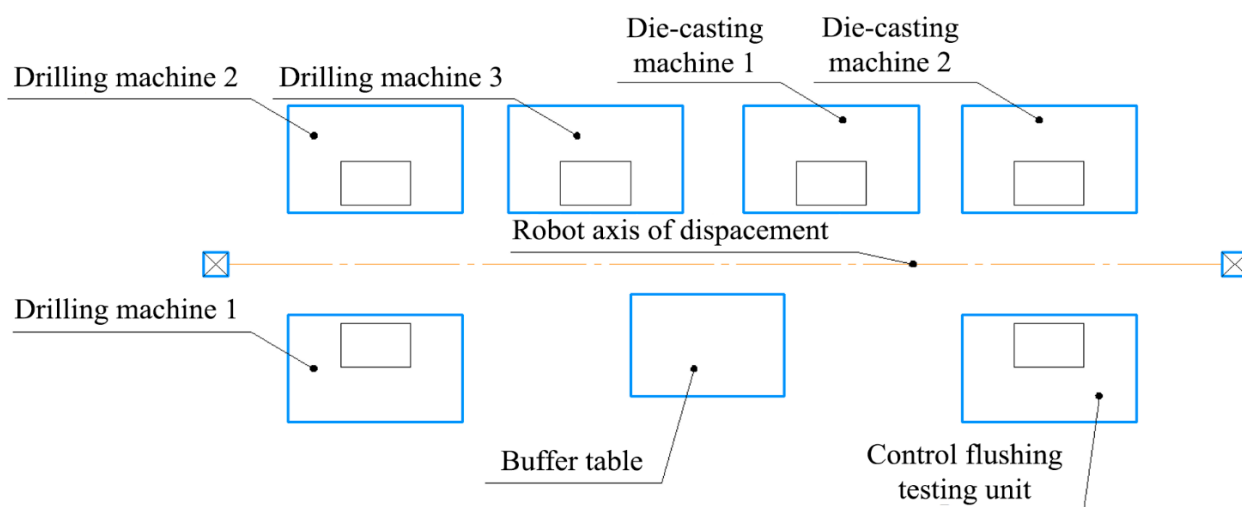


Рис. 3. Эскиз планировки робототехнического комплекса

Fig. 3. Robotic complex draft

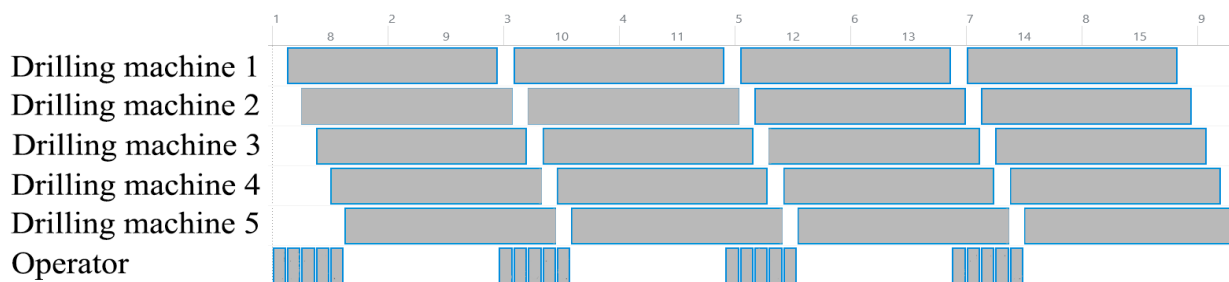


Рис. 4. Циклограмма изготовления отверстий перфорации: исходный технологический процесс

Fig. 4. Timing diagram of holes machining in original process

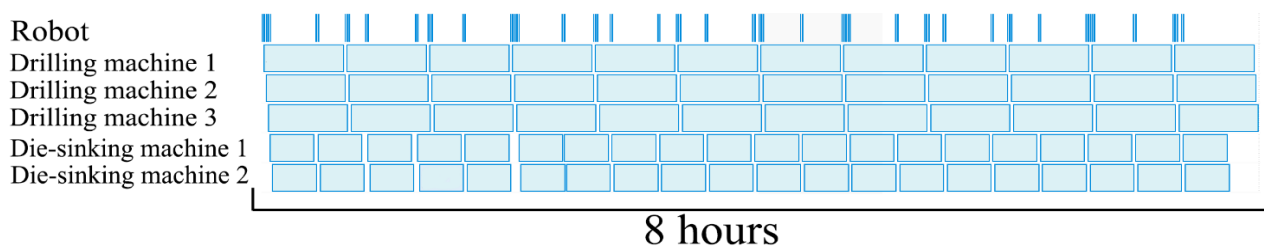


Рис. 5. Циклограмма изготовления отверстий перфорации в робототехническом комплексе

Fig. 5. Timing diagram of holes machining in robotics complex

Сравнение с исходной схемой ручного закрепления и снятия заготовок в станках демонстрирует рост производительности в 2–2,5 раза.

2. Конструкция вспомогательных устройств

Частая смена лопаток в станках сопряжена с большими затратами времени на

операции установка, снятия и перемещения заготовки между станками. Использование системы приспособлений быстрой смены заготовок (zeropoint system) сокращает время на переналадку и базирование (рис. 6).

Спроектирован комплект быстросъемной оснастки на рис. 7, зажимаемой в технологическом оборудовании пневматическим устройством.

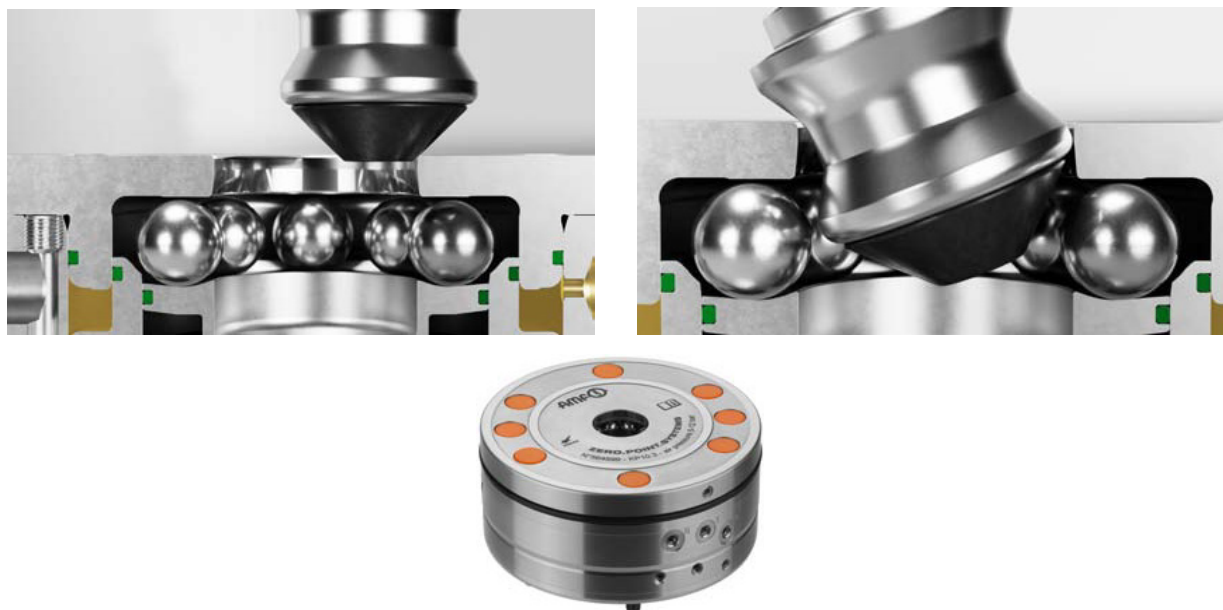


Рис. 6. Пневматическое устройство системы zeropoint

Fig. 6. Pneumatic device in zeropoint system

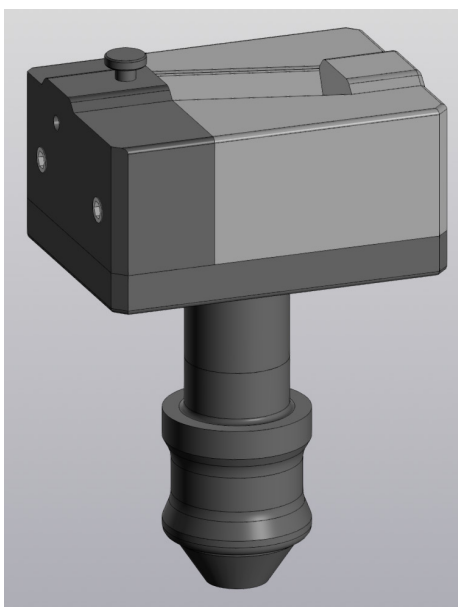


Рис. 7. Оснастка для закрепления заготовки

Fig. 7. Equipment for workpiece fastening

Достижимость робота-манипулятора всех единиц технологического оборудования реализуется системой линейных перемещений, изображенной на рис. 8. В состав линейной системы входит: 1 – стальной профиль; 2 – направляющая; 3 – рейка; 4 – ролик; 5 – блок смазки зубчатой передачи; 6 – вал-шестерня; 7 – угловой редуктор; 8 – каретка; 9 – сервомотор. Максимальная линейная скорость робота-манипулятора по системе линейных перемещений составляет 2 м/с.

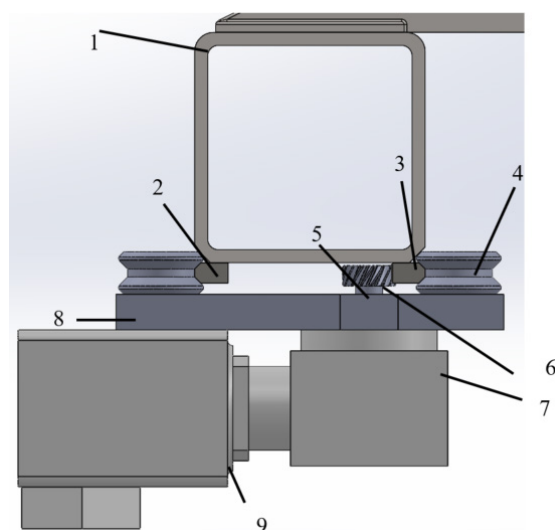


Рис. 8. Система линейных перемещений

Fig. 8. Linear movement system

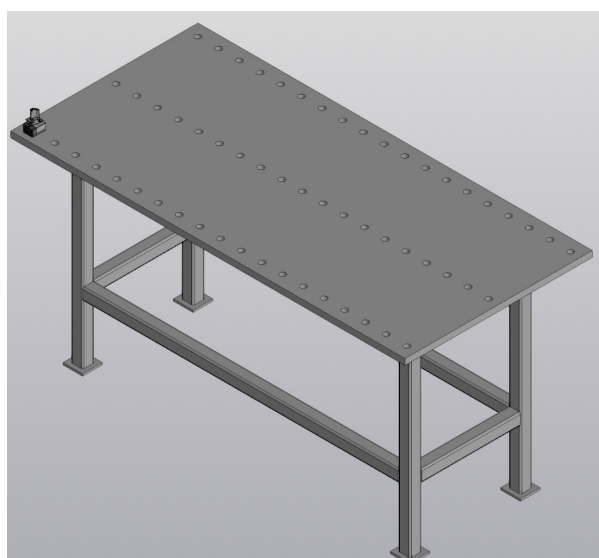


Рис. 9. Стол буферный

Fig. 9. Buffer table

Также РК оснащается установкой для контрольного пролива и столом-буфером (рис. 9). На установке контрольного пролива осуществляет измерение параметров пролива жидкости после изготовления очередного ряда отверстий на предмет неполного прожига. Стол-буфер служит для хранения промежуточного и законченного производства.

Вывод

Изучен технологический процесс ЭЭО, сложности его применения для сверления отверстий перфорации. Рассмотрены примеры роботизации ЭЭО, на основе чего выдвинуто предложение роботизации электроэрозионного оборудования путем распараллеливания ТП и автоматизации загрузки-выгрузки заготовок. Таким образом, спроектированный РК состоит из трех станков типа супердрель, двух копировально-прошивных станков, установки контрольного пролива, робота-манипулятора и двух столов-буферов. РК позволяет высвободить двух производственных рабочих и одного контролера, а производительность возрастает в 2–2,5 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Inozemtsev A.A., Sandratsky V.L. Gas turbine engines. Perm: OJSC «Aviadvigatel», 2006. P. 1204. (in Russian) [Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Пермь: ОАО «Авиадвигатель», 2006. 1204 с.].
2. Saitov E.N., Nikolaeva Ya.O., Bikbulatov A.M. Efficiency of various air cooling systems for gas turbine unit blades // Bulletin of Science and Education, 3, 5–9 (2019). (in Russian) [Сайтов Э.Н., Николаева Я.О., Бикбулатов А.М. Эффективность различных систем воздушного охлаждения лопаток газотурбинной установки // Вестник науки и образования. №3. 5–9 (2019).].
3. Tikhonov A.S., Samokhvalov N.Y. Analysis of the use of profiled perforation holes to improve the quality of film cooling of the nozzle blade back // Bulletin of USATU. 16 (5) 20–27 (2012). (in Russian) [Тихонов А.С., Самохвалов Н.Ю. Анализ использования профилированных отверстий перфорации для повышения качества пленочного охлаждения спинки сопловых лопаток турбин // Вестник УГАТУ. 16 (5) 20–27 (2012).].

4. Chai, Mingxia, Li, Zhiyong, Yan, Hongjuan, Sun, Xiaoyu, Experimental Investigations on Aircraft Blade Cooling Holes and CFD Fluid Analysis in Electrochemical Machining. // *Advances in Materials Science and Engineering*, (2019). DOI: 10.1155/2019/4219323

5. Guohua ZHANG, Rui ZHU, Gongnan XIE, Shulei LI, Bengt SUNDÉN, Optimization of cooling structures in gas turbines: A review. // *Chinese Journal of Aeronautics*, 35 (6) 18-46 (2022). DOI: 10.1016/j.cja.2021.08.029.

6. Yifan Yu, Shuliang Dong, Feilong Liu, Zixuan Cui, Xianhui Hou, Libao An. A review of advances in electrical discharge machining: From flow field to multi-physics coupled simulations. // *Results in Engineering*, 27 (2025). DOI: 10.1016/j.rineng.2025.106631

7. Khabibullin M.R., Fetsak S.I. Approaches to improve quality of electric-discharge holes drilling // In collection: Machine tool engineering and innovative machinery. Issues and point of increase. Materials of XIII Russian science and technical conference, 119-122 (2025). (In Russian) [Хабибуллин М.Р., Фецак С.И. Подходы к улучшению качества электроэрозионного сверления отверстий // В сборнике: Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста. Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции, 119-122 (2025)].

8. Mao, X., Wu, G., Tran, M. et al. Electrical discharge drilling of blind holes with injection flushing dielectric and stepped electrodes // *Int J Adv Manuf Technol*, 132, 495–511 (2024). DOI: 10.1007/s00170-024-13396-z

9. Eliseev Yu.S., Saushkin B.P. electric-discharge machining of aerospace engineering products. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2010. P. 437. (in Russian) [Елисеев Ю.С., Саушкин Б.П. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 437 .].

10. Artamonov B.A., Volkov Yu.S., Droazhalova V.I. et al. Electrophysical and electrochemical methods of material processing. Study guide (in 2 volumes). Vol.I. Processing of materials with the use of tools / Ed. by V.P. Smolentsev. Moscow: Vysshaya Shkola, 1983. P. 247. (in Russian) [Артамонов Б.А., Волков Ю.С., Дрожалова В.И. и др. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Учеб. пособие (в 2-х

томах). Т.1. Обработка материалов с применением инструмента / Под ред. В.П. Смоленцева. М.: Высшая школа, 1983. 247 с.].

11. Ivanov P.A., Ramenskaya E.V., Shaporev V.D. et al. Influence of electric-discharge machining machining modes on the quality of the surface layer // *Current Problems of Astronautics*, 10–12 (2020). (In Russian) [Иванов П.А., Раменская Е.В., Шаповрев В.Д. и др. Влияние режимов электроэрозионной обработки на качество поверхностного слоя // Актуальные проблемы космонавтики. 10–12 (2020).].

12. Foteev N.K. Technology of electric-discharge machining. Moscow: Mashinostroenie, 1980. P. 184. (in Russian) [Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1980. 184 с.].

13. Jiao, Anyuan, Liu, Weijun. Study of Manufacturing Process of Holes in Aeroengine Heat Shield. // *International Journal of Aerospace Engineering*, (2019). DOI: 10.1155/2019/5194268

14. F.T.B. Macedo, M. Wiessner, C. Hollenstein, F. Kuster, K. Wegener, Investigation of the Fundamentals of Tool Electrode Wear in Dry EDM. // *Procedia CIRP*, 46, 55-58 (2016). DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.170

15. Mao, Xuanyu & de Almeida, Sergio & Mo, John & Ding, Songlin. The state of the art of electrical discharge drilling: a review. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121, DOI: 10.1007/s00170-022-09549-7

16. Schulze, H. P., & Schätzing, W. Influences of different contaminations on the electro-erosive and the electrochemical micro-machining. // *Procedia Cirp*, 6, 58-63 (2013). DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.014

17. Hung Sung Liu, Biing Hwa Yan, Chien Liang Chen, Fuang Yuan Huang, Application of micro-EDM combined with high-frequency dither grinding to micro-hole machining // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 80-87 (2006). DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.03.017

18. Patent RF № 2824368C1, 22.2024. (in Russian) [Патент РФ № 2824368C1, 22.2024].

19. Patent RF № 2802609, 25.2023. (in Russian) [Патент РФ № 2802609, 25.2023].

20. Patent CN № 214161666, 2021.