

РАЗРАБОТКА РТК ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТКИ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ТВД

М. Р. ХАБИБУЛЛИН¹, С. И. ФЕЦАК²

¹habibullin.2001yandex.ru, ²format_invest@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация: Рассмотрены проблемы, присущие электроэрозионной обработке. Выдвинуто предложение по роботизации ЭЭО для сокращения времени на вспомогательные операции. Разработаны система автоматизированной оснастки и система линейных перемещений робота-манипулятора.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка; ряды перфораций; роботизация технологического процесса.

На текущий момент в авиадвигателестроении электроэрозионная обработка (ЭЭО) занимает около 7 % от всех операций механической обработки деталей, и её 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, вызвана дефицитом кадров на предприятиях и национальной политикой роботизации машиностроительного комплекса экономики.

Для исследования потенциала роботизации технологического процесса (ТП) ЭЭО выбрана деталь-имитатор рабочей 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.

Анализ литературы [1–4] 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 [5–7] выявил разработки в области роботизации электроэрозионной обработки, что говорит о принципиальной возможности и востребованности. 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.

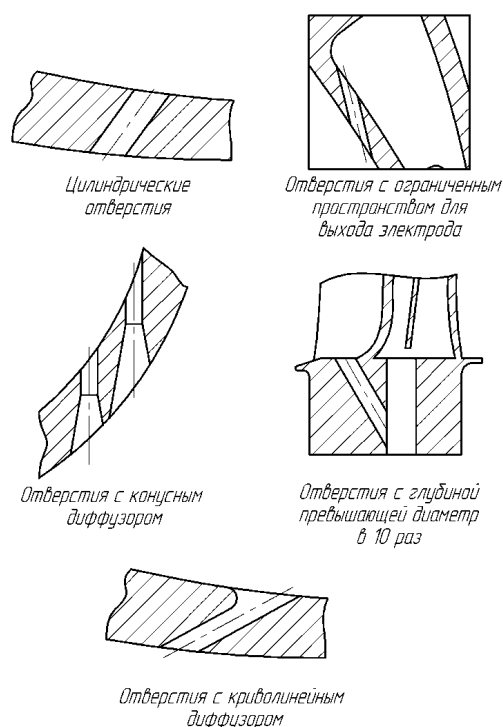


Рис. 1. Типы отверстий перфорации

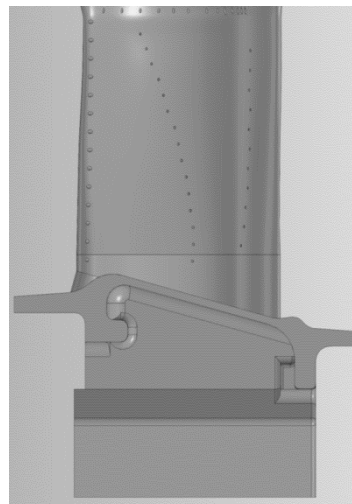


Рис. 2. Деталь-имитатор рабочей лопатки

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.

Таблица 1

Расчет машинного времени на изготовление рядов отверстий

№ ряда	Геометрия ряда	Диаметр, мм	Число отверстий	Операционное время, мин
1	Соосный	0,55	13	13
2	Соосный	0,55	14	14
3	Соосный	0,55	14	14
4	Несоосный	0,4	15	15
5	Несоосный	0,4	11	11
6	Соосный	0,3	30	30
7	Несоосный	0,3	12	12
8	Несоосный	0,6	1	1

Частая смена лопаток в станках сопряжена с большими затратами времени на операции установки, снятия и перемещения заготовки между станками. Использование системы приспособлений быстрой смены заготовок (zeropoint system) сокращает время на переналадку и базирование (рис. 3).

Спроектирован комплект быстросъемной оснастки на рис. 4, зажимаемой в технологическом оборудовании пневматическим устройством.

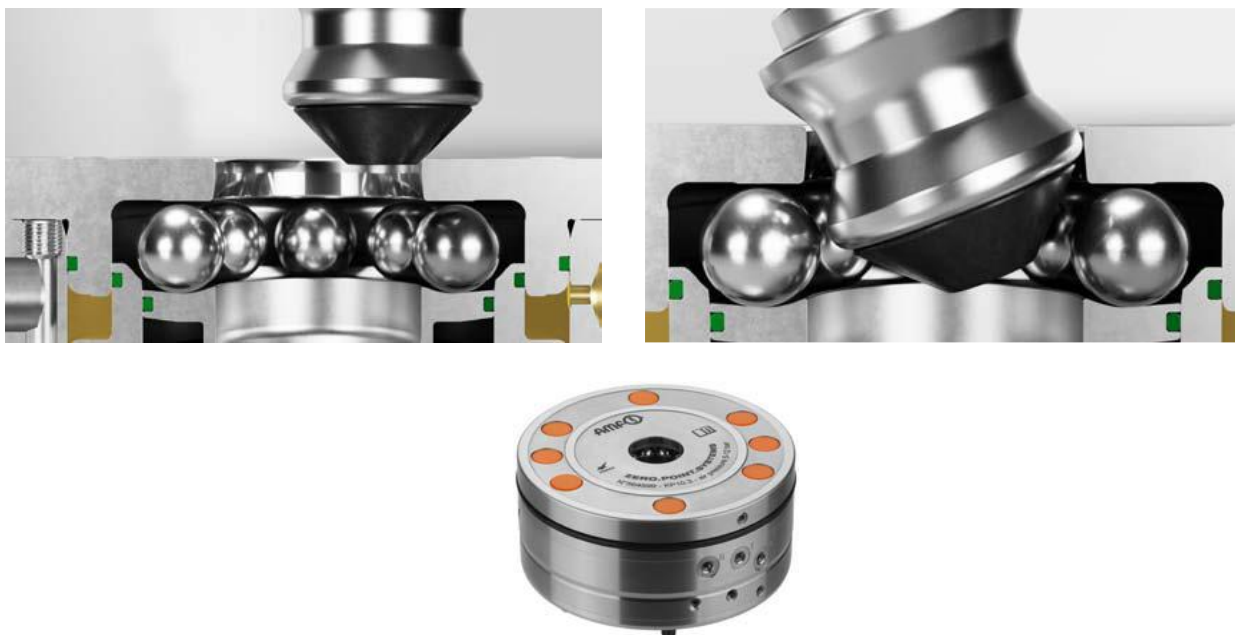


Рис. 3. Пневматическое устройство системы zeropoint

Для оптимизации маршрута обработки предложена схема робототехнического комплекса (РК) с разделенной обработкой на станках типа супердрель, оснащенных ТЭИ, и копировально-прошивных станках, оснащенных ГЭИ. На рис. 5 приведена планировка РК.

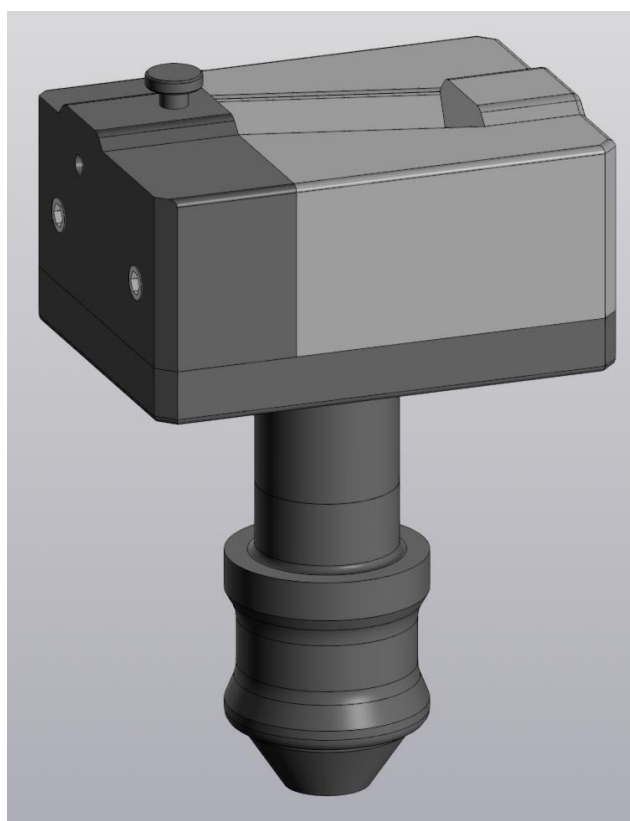


Рис. 4. Оснастка для закрепления заготовки

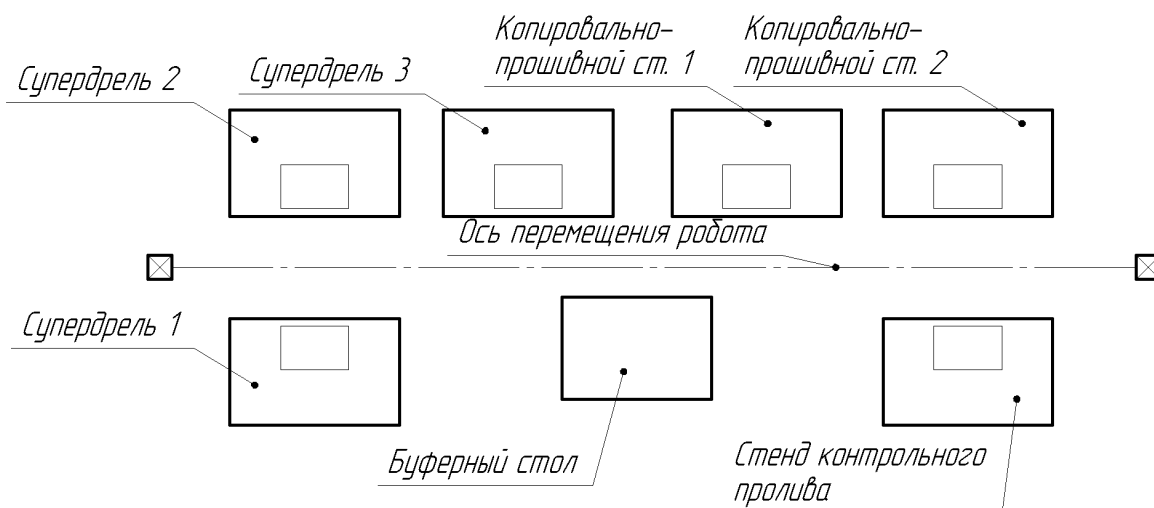


Рис. 5. Эскиз планировки РТК

Робот-манипулятор с двойным захватным устройством перемещает заготовки, закрепленные в оснастке. Циклограммы на рис. 6 и 7 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 %.

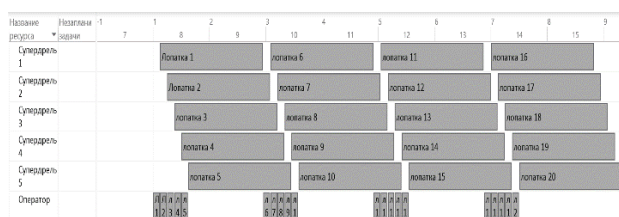


Рис. 6. Циклограмма изготовления отверстий перфорации: исходный ТП



Рис. 7. Циклограмма изготовления отверстий перфорации РТК

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

Достижимость робота-манипулятора всех единиц технологического оборудования реализуется системой линейных перемещений, изображенной на рис. 8. В состав линейной системы входят: 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.

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

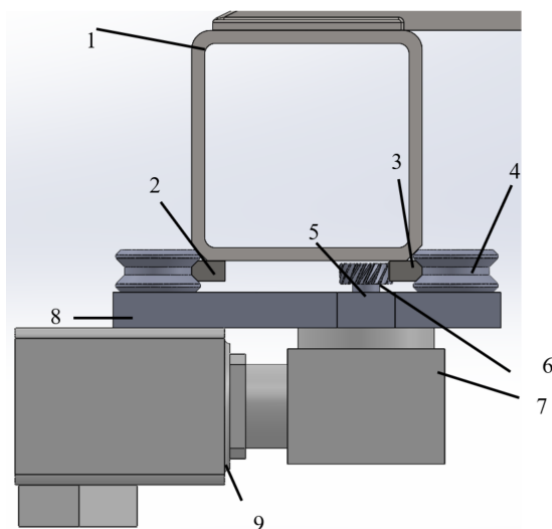


Рис. 8. Система линейных перемещений

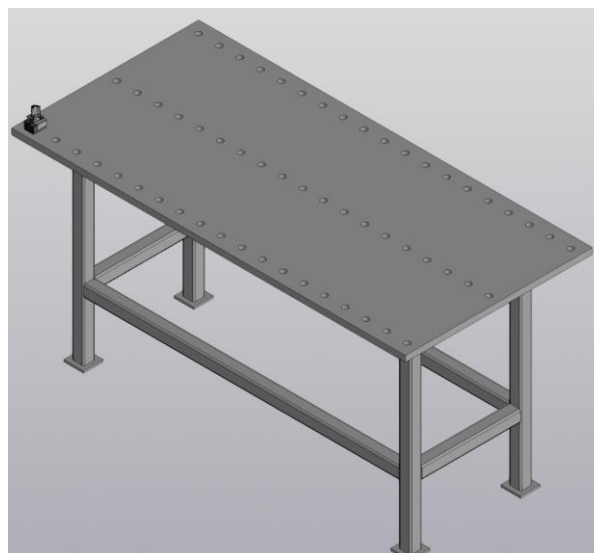


Рис. 9. Стол буферный

Проведено статическое исследование конструкции с максимальной прикладываемой нагрузкой в 300 кг – вес робота-манипулятора, крепимого на каретку. Материал опор, профиля, каретки – сталь 45Х, направляющие выполнены из легированной стали. Итого общая масса мостовой конструкции с ПР составляет около 1540 кг. Для упрощения расчёта исключена косозубая передача, а все стыки заданы как жесткие. Исследование показало наибольшую деформацию в районе вершины опоры – на 1,126 мм (рис. 10). Однако деформация в том участке не является критическим фактором, поскольку никак не влияет на работоспособность РК в целом. Деформация на протяжении профиля изменяется не существенно: от 0,836 мм у опоры до 0,798 по середине профиля – общее изменение на 0,038 мм. Перепад высоты профиля на 0,038 не повлияет на точность ПР, а средняя величина перемещений по длине профиля 0,82 мм должна быть учтена при разработке управляющей программы.

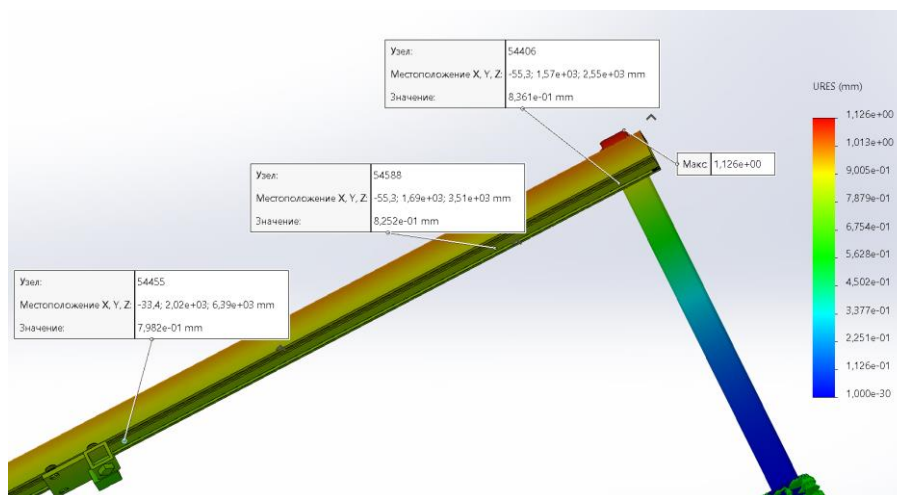


Рис. 10. Эпюра перемещений

Эпюра напряжений (рис. 11) показала наибольшее значение на участке крепления монтажного уголка к колонне $2,071 \cdot 10^7$ Па. При пределе текучести для стали марки 45Х $3,23 \cdot 10^8$ Па достигается коэффициент запаса прочности в ≈ 16 , что является более чем достаточным для эксплуатации ПР.

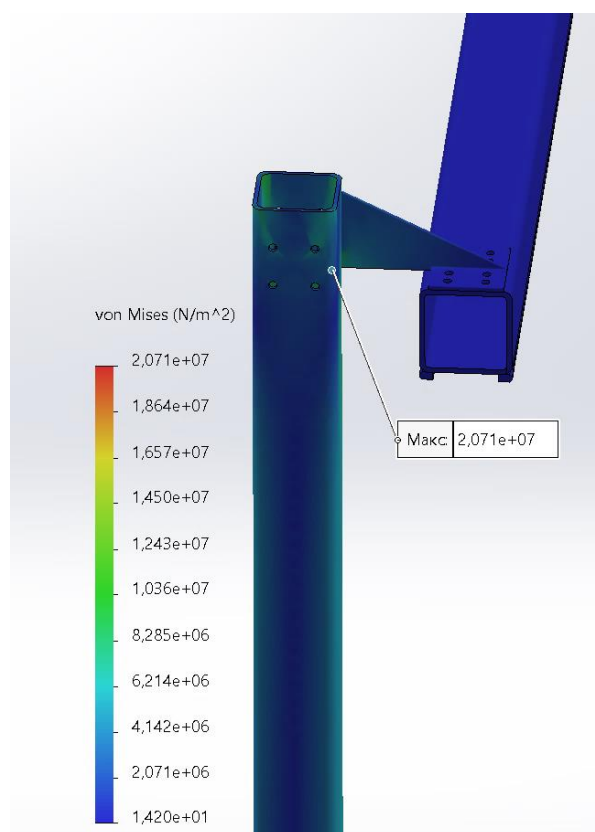


Рис. 11. Эпюра напряжений с наиболее нагруженным участком

Таким образом, 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. Елисеев, Ю. С. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / Ю. С. Елисеев, Б. П. Саушкин; под ред. Б. П. Саушкина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 437 с.
2. Артамонов, Б. А., Волков, Ю. С., Дрожалова, В. И. и др. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: Учебное пособие (в 2-х томах). Т.1. Обработка материалов с применением инструмента/ Под ред. В. П. Смоленцева. – М.: Высшая школа, 1983. – 247 с.
3. Влияние режимов электроэрозионной обработки на качество поверхностного слоя / П. А. Иванов, Е. В. Раменская, В. Д. Шапорев [и др.] // Актуальные проблемы космонавтики. – 2020. – С. 10–12.
4. Фотеев, Н. К. Технология электроэрозионной обработки/ Н. К. Фотеев.– М.: Машиностроение, 1980. – 184 с.
5. Патент на изобретение № 2824368С1. Роботизированное устройство для прошивки и обработки отверстий в изделии / Т. Р. Абляз, Е. С. Шлыков, Е. А. Гашев, И. В. Осинников, В. Т. Хайрулин, Е. В. Плотников; Бюл. №22, 2024.
6. Патент на изобретение № 2802609. Устройство для электроэрозионной прошивки отверстий электрод-инструментом / Т. Р. Абляз, Е. С. Шлыков, И. В. Осинников, Л. Е. Макарова, К. Р. Муратов, В. В. Ширяев; Бюл. №25, 2023.
7. Патент на изобретение № 214161666 / Робот для перемещения электродов. Suzhou Jiuwu Intelligent Technology Co ltd. 2021.

ОБ АВТОРЕ

ХАБИБУЛЛИН Марат Ринатович, студент каф. АТП.

ФЕЦАК Сергей Игоревич, к/н, доцент каф. АТП.

METADATA

Title: Development of a RTC for electrical discharge machining of a first-stage HPT.

Authors: M. R.Khabibullin ¹, S. I. Fetsak²

Affiliation:

^{1,2} Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹habibullin.2001yandex.ru, ²format_invest@mail.ru

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 2 (36), pp. 16-22, 2026.

ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: This paper examines the challenges associated with electrical discharge machining (EDM). To address these issues, a robotization approach for EDM is proposed with the aim of minimizing auxiliary operation time. An automated fixture system and a linear displacement system for the manipulator robot have been designed.

Key words: electrical discharge machining; perforation patterns; process robotization.

About authors:

KHABIBULLIN Marat Rinatovich, student, Dept. of ATP (UUST).

FETSAK Sergey Igorevich, Ph.D., Assoc. Prof., Dept. ATP (UUST).