

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №3(153). С.3-11.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №3 (153). P. 3-11.

Научная статья
УДК 621.91
doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-11

Моделирование скругления острых кромок наклонных охлаждающих отверстий лопаток турбин методом электроэрозионного фрезерования на многоосевых станках с ЧПУ

Владимир Федорович Макаров¹, д.т.н.
Михаил Владимирович Песин², д.т.н.
Михаил Андреевич Мяснов³, аспирант
Марк Михайлович Песин⁴, студент

^{1, 2, 3, 4} Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

¹ makarovv@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0383-0208>

² m.pesin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ djoker.men@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁴ marking.p05@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы повышения производительности, качества и точности скругления острых кромок многочисленных охлаждающих отверстий в лопатках турбин газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов для современного растущего пассажирского авиационного транспорта на основе разработки новой технологии электроэрозионного фрезерования с применением современных многоосевых станков с ЧПУ с вращающимся полым электродом и высоконапорной подачей специальной смывающей жидкости через тело электрода. Разработан автоматизированный процесс обработки острых кромок на выходе более 200 охлаждающих разнорасположенных наклонных отверстий диаметром 0,45...0,6 мм в одной лопатке, который применяется вместо трудоемкой ручной слесарной обработки различными надфилями, абразивными и металлическими шарошками. Установлено, что в результате выполненного моделирования и разработки специального программного обеспечения стабильно выполняется с высокой точностью равномерный радиус скругления методом автоматического электроэрозионного фрезерования вдоль всей выходной кромки каждого наклонного отверстия в лопатках турбины на многоосевом обрабатывающем электроэрозионном центре. Применение скругленной кромки выходных отверстий обеспечивает более эффективное охлаждение лопаток турбины и более высокие показатели работы газотурбинных двигателей. Одновременно установлено, что с значительным повышением производительности обработки острых кромок лопаток обеспечено более высокое качество поверхностей скругленной кромки отверстий. Результаты проведенных исследований рекомендуются для внедрения на предприятиях авиадвигателестроения.

Ключевые слова: лопатки турбины, острые кромки, радиус скругления, электроэрозионное фрезерование, качество поверхности, программирование, траектория электрода

Для цитирования: Макаров В.Ф., Песин М.В., Мяснов М.А., Песин М.М. Моделирование скругления острых кромок наклонных охлаждающих отверстий лопаток турбин методом электроэрозионного фрезерования на многоосевых станках с ЧПУ // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 3 (153). С. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-11

Modeling of sharp edge smoothing of turbine blades angular fans by the method of ED milling operation on multi-axis CNC machines

Vladimir F. Makarov¹, D. Eng.
Mikhail V. Pesin², D. Eng.
Mikhail A. Myasnov³, PhD student
Mark M. Pesin⁴, student
^{1, 2, 3, 4} Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
¹ makarovv@pstu.ru
² m.pesin@mail.ru
³ djoker.men@yandex.ru
⁴ marking.p05@mail.ru

Abstract. The article views efficiency improving issues, quality and accuracy of sharp edge smoothing for numerous angular fans in the turbine blades of gas turbine engines made of heat-resistant nickel alloys and used in modern growing passenger aviation transport based on the development of ED milling new technology for modern multi-axis CNC machines with a rotating hollow electrode and a high-pressure fluid supply of a special flush through the electrode body. An automated process for sharp edge machining has been developed for the production of more than 200 differently placed angular fans with a diameter of 0,45...0,6 mm in one blade instead of labor-intensive manual benchwork, where various needles, abrasive and metal rotary files are used. It is found that modeling and the development of special software resulted in a uniform radius of smoothing with high accuracy due to automatic ED milling operation along the entire trailing edge of each angular hole in the turbine blades at a multi-axis machining electro discharge center. The use of a rounded edge of the outlet ports provides more efficient cooling of the turbine blades and higher performance of gas turbine engines. At the same time, it is found that with a significant efficiency improving in blade sharp edge machining, a higher quality of the rounded edge surfaces in the holes is ensured. The results of the conducted research are recommended for the adoption of technologies in the aircraft engine industry.

Keywords: turbine blades, sharp edges, rounded radius, ED milling operation, surface quality, programming, electrode trajectory

For citation: Makarov V.F., Pesin M.V., Myasnov M.A., Pesin M.M. Modeling of sharp edge smoothing of turbine blades angular fans by the method of ED milling operation on multi-axis CNC machines / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 3 (153). P. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-11

Введение

В Российской Федерации в настоящее время поставлены задачи перед авиационными моторостроительными предприятиями по ускоренному производству большого количества современных отечественных газотурбинных двигателей, таких как ПС-90А, ПД-8, ПД-14 и др. с характеристиками, не уступающими мировым аналогам газотурбинной техники [1]. Решение этой проблемы на предприятиях моторостроения возможно путем применения новых технологических решений, которые обеспечат существенный рост производительности изготовления при стабильно высоких параметрах качества и конкурентоспособности газотурбинных двигателей. Одним из наиболее трудоемких узлов газотурбинного двигателя является узел газовой турбины, состоящий из дисков, рабочих и сопловых

лопаток из труднообрабатываемых жаропрочных сплавов на никелевой основе.

Лопатки турбин в эксплуатации испытывают высокие силовые и тепловые нагрузки до 1200...1400 °С, поэтому они изготавливаются из жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6У-ВИ, ЧС-70 путем литья по выплавляемым моделям. Для охлаждения профиля пера и полка рабочих и сопловых лопаток турбин выполняются электроэрозионным методом более 200 различных наклонных отверстий малых диаметров 0,45...0,6 мм, через которые подается сжатый воздух (рис. 1). Острые выходные кромки этих наклонных охлаждающих отверстий необходимо скруглить равномерным радиусом до 0,3 мм, т. к. кромки являются концентраторами напряжений и могут вызвать образование сколов, трещин и разрушения лопаток.

методе базирования реальный профиль лопатки совмещается с теоретическим профилем с заданной точностью. Метод базирования по шести точкам позволяет использовать простое не точное быстросменное приспособление. При этом исключается литейная погрешность и погрешность установки.

Применяемый сегодня технологический процесс изготовления лопаток на АО «ОДК-ПМ» ориентирован именно на ЭЭФ, т. к. применяемое оборудование (станки Winbro HSD6-III) может последовательно выполнять операции прошивки охлаждающих отверстий в лопатке и формирование диффузоров или скруглений кромок отверстий. Однако,

как указано ранее, существует проблема подготовки УП для данного оборудования. Для этих целей существует ряд так называемых САМ систем. САМ (англ. Computer Aided Manufacturing) – автоматизированная система, либо модуль автоматизированной системы, предназначенный для подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ. Активно применяются такие продукты как Siemens NX, ESPRIT, CAMWorks, SprutCAM и PowerMill. В том числе, Siemens NX широко применяется на предприятии АО «ОДК-ПМ» [10]. Общие виды электроэрозионного станка фирмы Group Technologies Ltd, показаны на рис. 2.

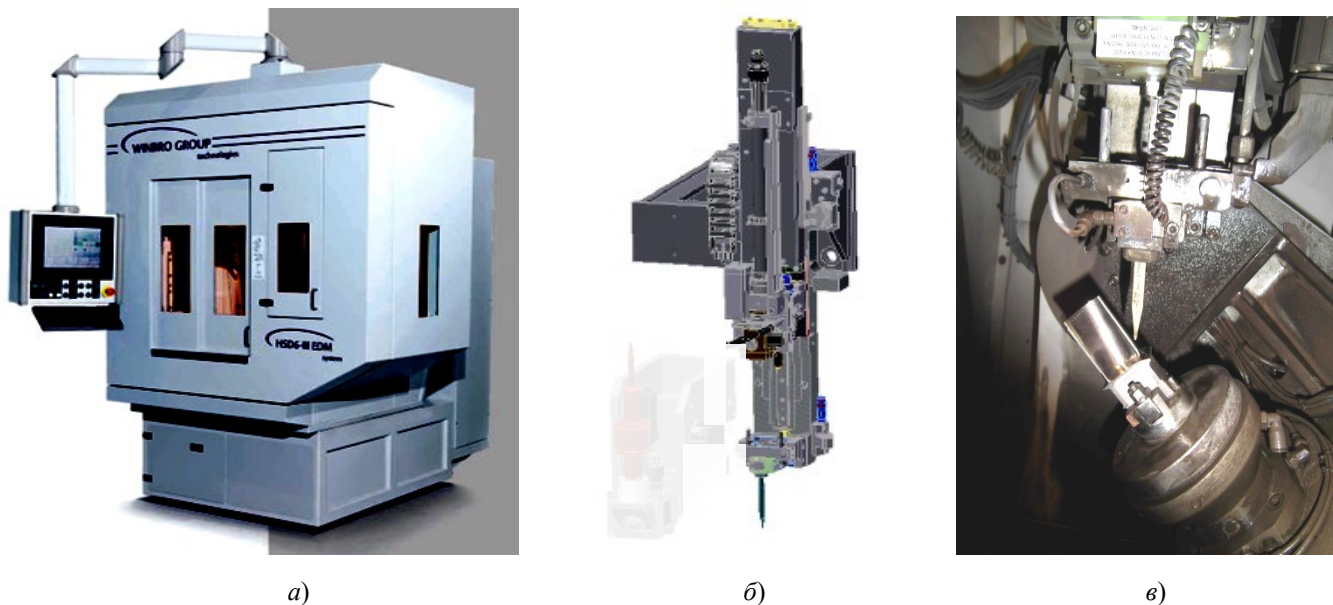


Рис. 2. Общие виды электроэрозионного станка фирмы Winbro Group Technologies Ltd (Англия) модели HSD6-III (а), электроэрозионной головки станка (б) и зоны обработки отверстий в рабочей лопатке одиночным полым электродом (в)

Fig. 2. General views of the Winbro Group Technologies Ltd (England) model HSD6-III (a), spark-erosion head (b) and the machining area with a single hollow electrode in the working blade (c)

В ЧПУ станках есть специальный программный модуль, позволяющий производить обработку отверстий в виде воронки на плоских участках. Особенностью станков является наличие семи одновременно управляемых координат. Кроме этого, имеется возможность выполнения обработки рядов отверстий мультиэлектродом. Наличие магазина инструментов и возможности автоматической замены электродов в процессе обработки позволяет сократить вспомогательное время выполнения операции и значительно повысить качество

обработки. Станки, специализированные на такую обработку, называют супердрелями. В качестве рабочих жидкостей используются дистиллированная вода и специальные составы на водной основе. Рабочая жидкость под давлением подается через отверстия в ЭИ и оптимально удаляет из отверстия частички шлама и образующиеся газы. Электроды направляются через кондукторные втулки, изготавливаемые из алмаза, сапфира и др. сверхтвердых материалов. Благодаря оборудованию класса «Супердрель» появилась возможность

выполнять в охлаждаемых лопатках турбины отверстия диаметром 0,2...0,3 мм на глубину до 10 мм, а также расфрезеровывать фаски на выходе их отверстия этим же электродом [4, 5]. Изготовление таких отверстий традиционными методами сопряжено с большими трудностями, а иногда вообще невозможно.

В настоящее время для перфорации лопаток электроэрозионным способом используются электроды-инструменты двух типов – трубчатые и стержневые с диэлектрической оболочкой. Фирма Winbro выпускает трубчатые электроды диаметром до 0,3 мм для скоростной электроэрозионной обработки. Инструмент сконструирован с учетом оптимального расстояния между цангой и направляющей, что позволяет быстро перемещаться от отверстия к отверстию, даже имея короткий

электрод, т. к. заправка и вытягивание электрода требуются не часто.

Управляющая программа станка частично параметризирована, т. е. координаты перемещения и обработки отверстий рассчитываются станком автоматически. Программа имеет упрощенный алгоритм расчета координат, поэтому после обработки форма обработанных кромок отверстий отличается от требований конструкторской документации и больше похожа на фаску.

Для обеспечения обработки отверстий в различных плоскостях и координатах лопатки устанавливаются по базовым поверхностям в специальном многоосевом поворотном приспособлении (при помощи резьбовой шпильки, проходящей через внутреннюю полость (рис. 3).



Рис. 3. Общий вид установки и разворота рабочей лопатки турбины в многоосевом поворотном приспособлении

Fig. 3. General view of the installation and rotation of the turbine working blade in a multi-axis rotary device

Система ЧПУ выдает команду на контроль геометрии лопатки с помощью контрольного щупа, и лопатка позиционируется по шести контрольным точкам путем разворота и совмещения с геометрической моделью лопатки.

Разработка математической модели равномерного скругления выходной кромки наклонного отверстия в турбинной лопатке

Для выполнения скругления острых кромок на станке с ЧПУ согласно требованиям конструкторской документации необходимо разработать программу перемещения электрода вдоль конкретной кромки в виде замкнутого ребра. Теоретические исследования методов получения траектории инструмента для

обработки скругленной кромки наклонных отверстий приведены в работах [6 – 8].

Геометрия скругленных кромок в лопатках выстраивается по множеству дуг скругления вдоль теоретического ребра пересечения стенки отверстия с профилем пера лопатки. Сложность описания геометрии скругления кромки отверстия лопатки состоит в том, что поверхность лопатки является криволинейной. Векторы нормали теоретического ребра расположены под различными углами.

Для расчета скругления необходимо иметь точное описание прилегающей к отверстию поверхности. Однако в некоторых случаях область вокруг отверстия можно рассматривать как сумма плоскостей, т. к. размеры отверстия и скругления достаточно малы по сравнению с радиусом кривизны профиля лопатки.

Данное допущение использовано для дальнейшего проектирования математической модели.

Диффузор на лопатке, с точки зрения технологии обработки, является низкотехнологичным конструктивным элементом, т. к. имеет сложную геометрию, которую затруднительно получить простыми технологическими движениями. Размер обрабатываемых элементов варьируется в пределах 0,05...0,8 мм. Материал заготовки относится к группе труднообрабатываемых материалов. Эти свойства накладывают ограничения на применение традиционных методов механической обработки, ввиду низкого срока службы обрабатывающего инструмента и его дороговизны. Поэтому и предложено электроэрозионное фрезерование на станке с ЧПУ.

Создание непараметризированной управляющей программы (УП) по геометрической (теоретической) модели с использованием системы автоматизированного проектирования затруднено в виду специфики оборудования. Для разработки УП на обработку скруглений отверстий на станке WINBRO необходимо иметь постпроцессор на данный станок. Реальный объект имеет пространственные отклонения профиля относительно теоретической модели до 0,05 мм на сторону. Таким образом, даже качественно спроектированная УП по теоретической модели должна иметь возможность автоматической коррекции координат согласно реальному объекту. Оборудование должно обеспечить сканирование реальной геометрии объекта с требуемой точностью и передачу данных сканирования в систему ЧПУ.

При разработке управляющих программ для ЭЭФ на станке необходимо предусмотреть возможность поддержания постоянного зазора между деталью и инструментом электродом ЭИ. На данный момент в ЭЭФ системах зазор и износ контролируется по множеству косвенных параметров. Размерный износ ЭИ непосредственно влияет на точность обрабатываемой геометрии. Поэтому в управляющей программе или в системе ЧПУ должны быть предусмотрены функции вычисления и компенсации размерного износа ЭИ.

В результате проведенного анализа установлено, что кромка наклонного отверстия является линией пересечения плоскости и

цилиндра и представляет собой эллипс [2]. Вектора нормалей на плоской поверхности расположены согласно рис. 4, а, расположение векторов нормалей на цилиндрической части показаны на рис. 4, б. Принцип скругления криволинейного ребра показан на рис. 4, в. В каждой точке еще не скругленного ребра существует вектор нормали этого ребра.

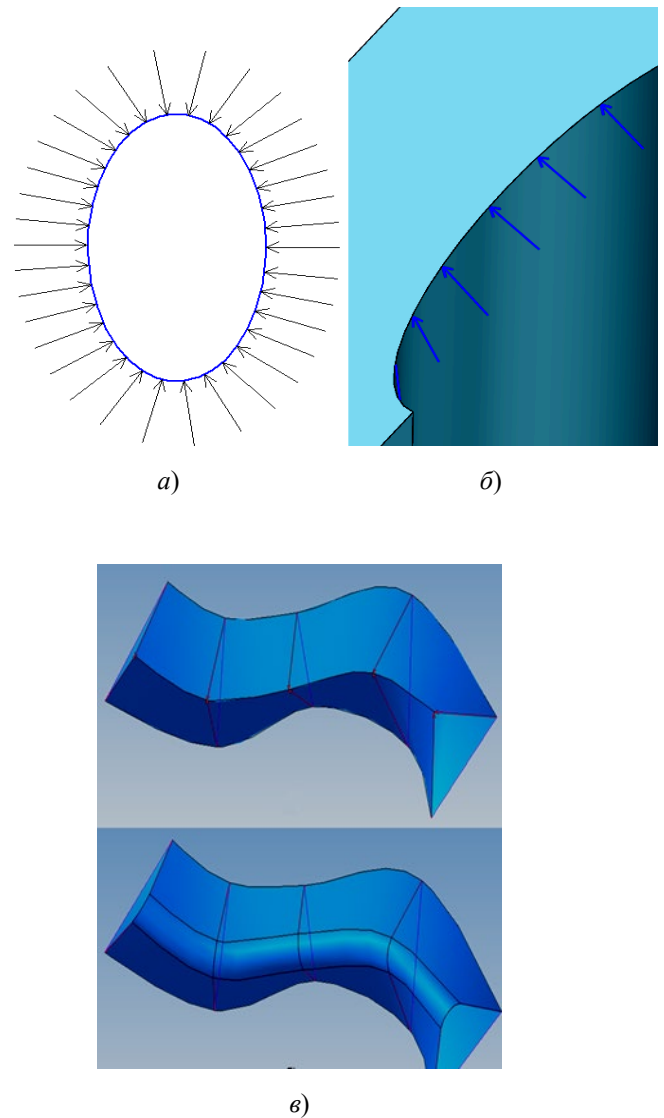


Рис. 4. Результаты геометрического анализа расположения острых кромок наклонных отверстий (а, б) и результат последовательного скругления острой кромки (в)

Fig. 4. Results of geometric analysis of the location of the angular holes sharp edges (a, b) and the result of sequential sharp edge smoothing (c)

Данный вектор может быть спроецирован на обе сопрягающиеся грани, точнее на плоскости касательных к этим граням. Так

получаются два вектора проекции нормали. В плоскости проходящей через эти вектора возможно построить кривую скругления. Двигаясь вдоль ребра, можно получить множество плоских кривых скругления.

На данный момент проведен эксперимент скругления кромок на электроэрозионном станке Winbro HSD6-III по специальной управляющей программе, разработанной на фирме

Winbro Group. Управляющая программа частично параметризована, т. е. координаты обработки рассчитываются станком автоматически. Однако программа имеет упрощенный алгоритм расчета координат, в результате чего форма обработанных кромок отверстия имеет отклонения от заданной формы и больше похожа на неровную фаску (рис. 5).

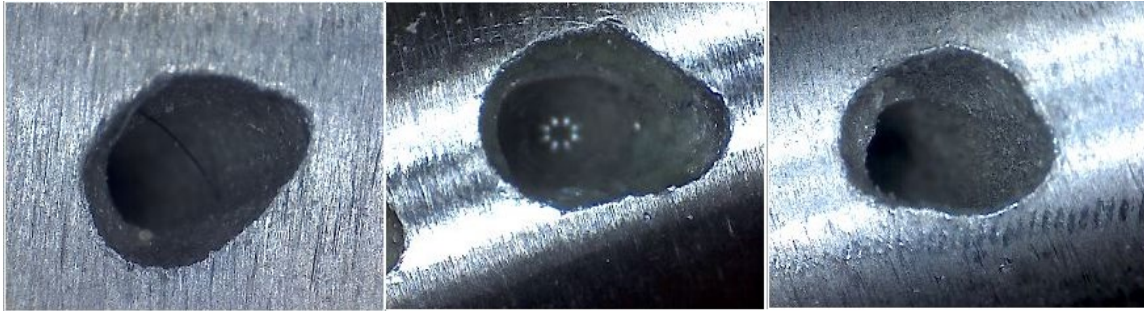


Рис. 5. Геометрия и вид фактического скругления кромок отверстий лопаток турбин, обработанных электроэрозионным фрезерованием по программе фирмы Winbro Group

Fig. 5. Geometry and type of actual rounding of the edges in the holes of turbine blades using ED milling operation according to the Winbro Group program

Создание УП для обработки равномерного скругления кромок наклонных отверстий и симуляцию обработки проведено в среде Siemens NX [10]. Размеры конструктивных элементов и инструмент масштабированы с соблюдением пропорций.

Для этого смоделированы геометрические модели детали и заготовки. Для упрощения модели рассмотрен случай расположения выхода отверстия на плоскую грань (рис. 6) до и после обработки скругления. При построении принят диаметр отверстия 20 мм, радиус скругления 10 мм.

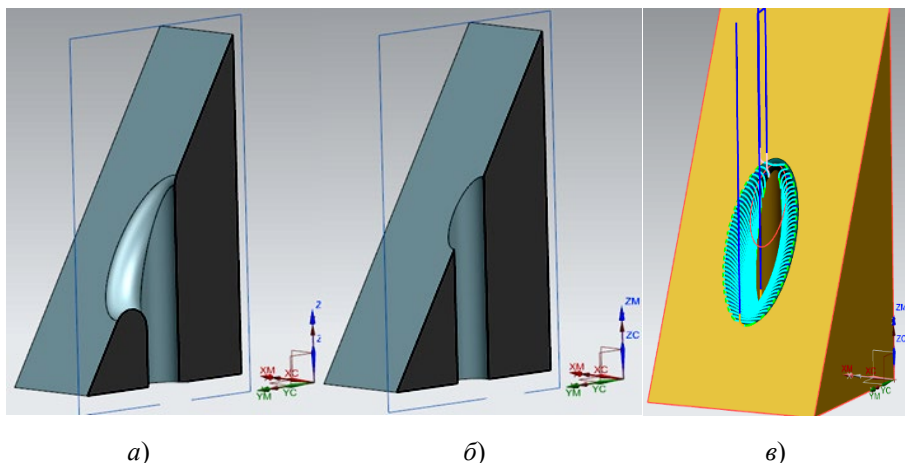


Рис. 6. Геометрические модели обработки выходной кромки отверстия на наклонную плоскость: а – после скругления кромки; б – до скругления кромки; в – визуализация процесса скругления

Fig. 6. Geometric models of hole trailing edge machining on an inclined plane: а – after edge smoothing; б – before edge smoothing; в – visualization of smoothing

На основании анализа геометрии обрабатываемых лопаток разработана математическая модель и алгоритм построения геометрии скругления кромки наклонного отверстия. При разработке приняты допущения, о том, что вектора нормалей расходятся радиально от оси отверстия и область вокруг отверстия является относительно плоской.

На основе математической модели и алгоритма спроектирован прототип управляющей программы на языке Visual Basic с использованием пакета Microsoft Excel в среде разработчика. Программа содержит в себе унифицированные операторы и структуры. Результаты работы программы экспортированы в САПР «КОМПАС-3D» и САМ «NX Обработка». В САМ «NX Обработка» проведена симуляция обработки с выводом геометрии обработанной поверхности в виде фасетного тела. По результатам установлено, что программа достаточно точно рассчитывает геометрию скругления и траекторию движения инструмента.

Обсуждение результатов моделирования

По результатам моделирования проведен анализ полученной геометрии скругленных кромок наклонных отверстий. Установлено, что форма скруглений не совсем соответствует требованиям конструкторской документации (КД) на лопатках турбины высокого давления (ТВД). Это связано, по-видимому, с упрощением предложенного расчета геометрии скругления. Для решения проблемы необходимо разработать более гибкие автоматические программы, способные адаптировать траекторию обработки в зависимости от реальной геометрии. Для этого необходимо создать математическое описание обрабатываемой поверхности и провести некоторые доработки. Так, при расчете точек дуги скругления расстояние между точками не равномерное. Для равномерного распределения точек добавлен модификатор шага приращения координаты полярного радиуса. При обработке инструментом большого, относительно размеров отверстия, диаметра возникают зарезы и уступы на необрабатываемой поверхности. Связано это с применением упрощенного корректора на диаметр инструмента. При обработке дуги скругления при остром локальном угле глубина обработки

может быть достаточно большой, для этого предусмотрено построение траектории с обработкой в несколько проходов. При адаптации программы на многоосевой электроэрозионный станок добавлен блок расчета износа инструмента и блок корректировки координаты высоты в соответствии износу.

Выводы

На основании теоретических исследований спроектирован программный продукт, благодаря которому может быть автоматически рассчитана траектория движения электрода – инструмента при обработке равномерного скругления выходной кромки наклонного отверстия в различных лопатках турбин газотурбинных двигателей. Выходные данные разработанной программы пригодны для экспорта в САМ системы. Программа, после приведенной выше доработки, может быть интегрирована в систему ЧПУ для последовательного расчета точек во время обработки.

Результаты проведенных исследований рекомендуются для внедрения на предприятиях авиадвигателестроения. Для установки программного продукта на конкретный станок необходимо изменить названия операторов согласно выбранной системы ЧПУ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л.** Газотурбинные двигатели. Пермь, 2006. 1195 с.
2. **Конструкция** основных узлов двигателя ПС-90А. Учеб. пособие – 2-е изд. испр. и доп. / М.А. Нихамкин, М.М. Зальцман. Перм. гос. техн. ун-т. Пермь 2002. 108 с.
3. **Бойко А.Ф.** Эффективная технология и оборудование для электроэрозионной прошивки прецизионных микроотверстий: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. 314 с.
4. **Владыкин А.В., Макаров В.Ф.** Повышение эффективности обработки отверстий малых диаметров в деталях из жаропрочных сплавов на основе применения метода электроэрозионного сверления // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьёва. 2010. № 2 (17). С. 29–37.
5. **Владыкин А.В., Макаров В.Ф.** Расчёт производительности высокоскоростной электроэрозионной обработки отверстий в жаропрочном сплаве полым вращающимся электродом-инструментом // Научные технологии в машиностроении и авиадвигателестроении

(ТМ – 2012): материалы IV Междунар. науч. – техн. конф., посвящ. 75-летию В.Ф. Безьязычного, 3-5 сент. 2012 г., Рыбинск: в 2 ч. / М-во образования и науки РФ [и др.] Рыбинск: РГАТУ им. П.А. Соловьёва, 2012. Ч. II. С. 135–142.

6. **Физико-химические** методы обработки в производстве газотурбинных двигателей: Учеб. пособие / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, А.А. Митрофанов и др.; Под ред. Б.П. Саушкина. М.: Дрофа, 2002. 656 с.

7. **Бойцов А.Г., Токмакова Т.В., Денисов Л.В.** Особенности и технологические возможности некоторых схем электроэрозионного фрезерования // Труды ГОСНИТИ. 2010. Т. 106. С. 97–99.

8. **Верман В.Ю., Дедков В.М., Казанцев Е.А.** Способ электрохимического скругления кромок отверстия // Патент СССР № 367996, 1973. Бюл. № 9.

9. **Журавлев Г.И., Шаймарк Л.С., Орлов П.Н., Александровская Т.А., Кукушкин А.С., Преснов В.Н.** Способ электрообработки отверстий малого диаметра // Патент СССР № 180855, 1993. Бюл. № 14.

10. **Михеев Р.** VBA и программирование в MS Office для пользователей. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 369 с.

REFERENCES

1. Inozemtsev A.A., Sandratsky V.L. Gas turbine engines. Perm, 2006, 1195 p.

2. The design of the main components of the PS-90A engine. Study guide – 2nd ed., revised and enlarged / M.A. Nihamkin, M.M. Zaltsman. Perm, State Technical University, Perm, 2002, 108 p.

3. Boyko A.F. Efficient technology and equipment for electroerosive firmware for precision microholes monograph. Belgorod: Publishing house of BSTU, 2010, 314 p.

4. Vladykin A.V., Makarov V.F. Efficiency improving when machining small diameter holes in parts made of heat-resistant alloys based on the use of the method of electrosark drilling // Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P.A. Solovyov. 2010, No. 2 (17), pp. 29–37.

5. Vladykin A.V., Makarov V.F. Calculation of the productivity of high-speed electroerosion treatment of holes in a heat-resistant alloy with a hollow rotating electrode-tool // Science-intensive technologies in mechanical engineering and aircraft engine building (ТМ – 2012): proceedings of the IV International Scientific and Technical conf., dedicated to the 75th anniversary of V.F. Bezyagny, 3-5 September 2012, Rybinsk: in 2 parts/ Ministry of Education and Science of the Russian Federation [et al.] Rybinsk: P.A. Solovyov Russian State Technical University, 2012, Part II, pp. 135–142.

6. Physico-chemical processing methods in the production of gas turbine engines: Textbook / Y.S. Eliseev, V.V. Krymov, A.A. Mitrofanov, et al; Edited by B.P. Saushkin. Moscow: Drofa, 2002, 656 p.

7. Boytsov A.G., Tokmakova T.V., Denisov L.V. Features and technological capabilities of some schemes of ED milling operation // Proceedings of GOSNITI. 2010, vol. 106, pp. 97–99.

8. Veroman V.Yu., Dedkov V.M., Kazantsev E.A. Method of electrochemical rounding of hole edges // USSR Patent USSR, No. 367996, 1973, Bul. No. 9.

9. Zhuravlev G.I., Naimark L.S., Orlov P.N., Alexandrovskaya T.A., Kukushkin A.S., Presnov V.N. Method of electrical processing of small diameter holes // Patent USSR, No. 180855, 1993, Bul. No. 14.

10. Mikheev R. VBA and programming in MS Office for users. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2006, 369 p.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.02.2024; одобрена после рецензирования 19.02.2024; принята к публикации 24.02.2024.

The article was submitted 14.02.2024; approved after reviewing 19.02.2024; assepted for publication 24.02.2024.