

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №6 (144). С.9-19.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №6 (144). P. 9-19.

Научная статья

УДК 621.91

doi: 10.30987/2223-4608-2023-9-19

## Повышение эффективности прорезки глубоких елочных пазов в дисках газовых турбин из жаропрочных сплавов путем применения комбинированного метода гидроабразивной обработки и протягивания

Владимир Федорович Макаров<sup>1</sup>, д.т.н.

Михаил Владимирович Песин<sup>2</sup>, д.т.н.

Максим Владимирович Волков<sup>3</sup>, аспирант

<sup>1, 2, 3</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
614990, Пермский край, г. Пермь, Россия

<sup>1, 3</sup> makarovv@pstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0383-0208>

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

**Аннотация.** Рассмотрена эффективность применения новой технологии обработки елочных пазов в дисках турбин на основе комбинации операций предварительной вырезки «домика» методом гидроабразивной обработки (ГАО) и окончательного протягивания елочного профиля на станке с ЧПУ в сравнении с методами фрезерования, глубинного шлифования и электроэрозионной обработки. Проблемы, возникающие при изготовлении и эксплуатации протяжек, часто приводят к простоям как основного, так и инструментального производства. При этом неизбежно сдерживаются заданные высокие темпы роста производства газотурбинных двигателей, значительно растут затраты на изготовление комплектов многосекционных елочных протяжек. Для решения проблемы предложено применить различные совмещенные методы обработки, т. е. предварительную вырезку «домика» пазов проводить различными производительными методами вырезки такими, как глубинного шлифования, фрезерования, электроэрозионной и гидроабразивной обработки, а окончательную обработку – методом чистового профильного протягивания. Проведенные предварительные расчеты трудоемкости и затрат производства при сравнительных испытаниях различных совмещенных вариантов предварительной прорезки пазов показали преимущество гидроабразивной вырезки.

В результате проведенных экспериментальных исследований по прорезке пазов гидроабразивным методом и последующим протягиванием окончательными профильными протяжками установлено, что профиль предварительно вырезанного паза с учетом измеренного увода профиля находится в поле допуска перед чистовым елочным профилем окончательной протяжки, что говорит о пригодности вырезанного гидроабразивным методом паза к окончательному протягиванию. После окончательного протягивания елочного профиля проведен электронный контроль и установлено, что все основные размеры в профиле елочных пазов получены в пределах допуска и являются годными по техническим условиям. Предложено провести дальнейшую экспериментальную работу на конкретных серийных дисках турбин, чтобы принять решение о внедрении новой технологии в серийное производство.

**Ключевые слова:** протягивание, протяжки, елочные пазы, диски турбин, газотурбинные двигатели, гидроабразивная обработка, точность профиля

**Для цитирования:** Макаров В.Ф., Песин М.В., Волков М.В. Повышение эффективности прорезки глубоких елочных пазов в дисках газовых турбин из жаропрочных сплавов путем применения комбинированного метода гидроабразивной обработки и протягивания // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 6 (144). С. 9–19. doi: 10.30987/2223-4608-2023-9-19

## Increasing the efficiency of slotting deep fir trees in gas turbine discs made of heat-resistant alloys by applying a combined method of hydroabrasive treatment and broaching

Vladimir F. Makarov<sup>1</sup>, D. Eng.

Mikhail V. Pesin<sup>2</sup>, D. Eng.

Maxim V. Volkov<sup>3</sup>, PhD student

<sup>1, 2, 3</sup> Perm National Research Polytechnic University, 614990, Permskiy Krai, Perm, Russia

<sup>1, 3</sup> makarovv@pstu.ru,

<sup>2</sup> m.pesin@mail.ru

**Abstract.** The efficiency of the application of a new technology for fir-tree slots treatment in turbine discs based on a combination of pre-slotting operations of the «house» by hydro-abrasive treatment (HAT) and final broaching of the herringbone on a CNC machine in comparison with milling, deep grinding and EDM-ing methods is viewed. Problems arising within manufacturing and operating of broaches often cause down-time of both types: main and tool production. At the same time, the set high growth rates of production of gas turbine engines are inevitably restrained, the costs of manufacturing sets of multi-section fir-tree broaches are significantly increasing. To solve the problem, various combined processing techniques are proposed for the application, i.e., the pre-slotting of the «house» of broaches is carried out by various productive cutting methods such as deep grinding, milling, EDM-ing and HAT, while finishing is carried out using finishing profile broaching technique. The preliminary calculations of labor intensity and production costs carried out during comparative tests of various combined variants of pre-slotting have proved the advantages of HAT cutting.

As a result of the experimental studies, conducted on slotting, using HAT technique with subsequent broaching under final form broach, it was found that channel profile of the preliminary slot with allowances, made for measured profile deviation, is in the tolerable limit before final shape of the final broaching, which bears evidence of the slot appropriateness made by HAT method and its readiness for final broaching. After herringbone final broaching an electronic control was conducted and it was found that all the main dimensions in the herringbones are within tolerance limits and are suitable according to technic specifications. It is proposed to carry out further experimental work on particular stock-produced turbine disks for making a decision on the introduction of a new technology into mass production.

**Keywords:** broaching, broaches, fir-tree slots, turbine discs, gas turbine engines, hydroabrasive treatment, profile accuracy

**For citation:** Makarov V.F., Pesin M.V., Volkov M.V. Increasing the efficiency of slotting deep fir trees in gas turbine discs made of heat-resistant alloys by applying a combined method of hydroabrasive treatment and broaching. / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 6 (144). P.9–19. doi: 10.30987/2223-4608-2023-9-19

### Введение

Перед отечественными авиастроителями поставлены задачи в ближайшее время изготовить несколько сотен современных отечественных гражданских самолетов, таких как ТУ-214, Sukhoi Superjet 100 New и МС-21-310 и др. В свою очередь это потребует от авиационных моторостроительных предприятий ускоренного производства большого количества современных отечественных газотурбинных двигателей, таких как ПС-90А, ПД-8, ПД-14, ПД-35 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 повышения уровня конкурентоспособности газотурбинных двигателей, включая сокращение затрат производства и снижение себестоимости изделий. Наибольшая трудоемкость при обработке деталей газотурбинных двигателей (ГТД) проявляется при изготовлении деталей газовых турбин из жаропрочных никелевых сплавов, особенно дисков и лопаток турбин, имеющих сложные профильные поверхности елочных соединений.

По результатам проведенного анализа литературы и опыта предприятия в стране и за рубежом установлено, что основным, иногда единственным, методом обработки сложных высокоточных глубоких елочных пазов в дисках турбин является процесс протягивания. Трудоемкость операций протягивания

составляет на отдельных деталях 40...50 % от общей трудоемкости механической обработки [2].

Преимущество процесса протягивания перед другими видами механической обработки заключается в том, что помимо высокой производительности происходит одновременная предварительная и окончательная чистовая обработка профиля пазов, стабильно формирующая основные параметры высокой точности и качества поверхностного слоя, обеспечивающие высокую усталостную прочность дисков и лопаток ГТД. Елочные замковые соединения должны обеспечивать заданное расположение пера лопатки в газоздушном тракте для выполнения своего назначения. Поэтому сопряженные поверхности дисков и лопаток должны быть выполнены со следующими высокими параметрами точности (рис. 1, а): допуск на шаги зубьев «елочного» профиля  $\pm 0,003$  мм; допуск на перекося и непараллельность профиля зубьев – не более 0,02 мм; допуск на отклонение по углам профиля - 4...15'; величина шероховатости должна соответствовать  $Ra \leq 1,25$  мкм. Все эти параметры должны быть обеспечены точностью и качеством изготовления окончательных многосекционных протяжек.



а)



б)

Рис. 1. Диск турбины (а) с протянутыми елочными пазами на универсальном горизонтально-протяжном станке модели 7А540 (б)

На большинстве моторостроительных предприятиях протягивание елочных пазов в

дисках турбин осуществляется в несколько переходов на универсальных горизонтально-протяжных станках типа 7А540 в диапазоне скоростей резания от 1,5 до 6,0 м/мин и длиной хода протяжного блока с многосекционными протяжками 2,0 м (рис. 1, б) [6, 7].

Протяжные блоки станков комплектуются набором последовательно устанавливаемых многосекционных протяжек из быстрорежущих сталей для предварительной прорезки паза в виде «домика» (рис. 2, а) и для формирования елочного профиля паза комплектом окончательных протяжек (рис. 2, б). Скорость протягивания предварительных протяжек не превышает 4,0 м/мин, а на чистовых секциях скорость протягивания обычно снижается до 1,0...2,0 м/мин.



а)



б)













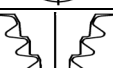



Рис. 2. Общий вид комплектов предварительных (а) и окончательных (б) многосекционных быстрорежущих протяжек для протягивания елочных пазов в дисках

Последовательность предварительного и окончательного протягивания елочных пазов в дисках турбин представлена в табл. 1. Предварительно (с первой по восьмую позицию) в диске протягивается глубокий паз в виде «домика» по генераторной схеме резания, а

окончательно (с девятой по шестнадцатую позицию) формируется елочный профиль паза

остальными чистовыми протяжками по профильной схеме резания.

**1. Схемы предварительного и окончательного протягивания елочных пазов в дисках турбин**

№ протяжки и блока	Схема предварительного протягивания «домика» паза	№ протяжки	Схема окончательного протягивания елочного паза
1 первый блок		9 третий блок	
2 первый блок		10 третий блок	
3 первый блок		11 третий блок	
4 первый блок		12 третий блок	
5 второй блок		13 четвертый блок	
6 второй блок		14 четвертый блок	
7 второй блок		15 четвертый блок	
8 второй блок		16 четвертый блок	

В связи с увеличением объема производства новых отечественных газотурбинных двигателей возникли проблемы значительного увеличения производства сложных высокоточных протяжек из порошковых быстрорежущих сталей повышенной производительности, особенно для протягивания елочных пазов в дисках газовых турбин.

Эти проблемы связаны с прекращением поставок из-за рубежа заготовок протяжек из прежних применяемых быстрорежущих порошковых сталей, поиском новых поставщиков, испытанием новых марок быстрорежущих сталей, в том числе и для протягивания новых более высокопрочных никелевых сплавов.

Изготовлением таких сложных профильных многосекционных протяжек занимаются традиционно только инструментальные цехи моторостроительных предприятий. Поэтому проблемы при изготовлении и эксплуатации протяжек часто приводят к простоям как основного, так и инструментального

производства. При этом неизбежно сдерживаются заданные высокие темпы роста производства газотурбинных двигателей, значительно растут затраты на изготовление комплектов многосекционных елочных протяжек.

Для уменьшения затрат на подготовку производства и снижения конечной цены изделия на ряде предприятий моторостроения проведены работы по поиску более эффективного (в плане меньших затрат на протяжки) способа прорезки елочных пазов. В основном предлагается применить различные совмещенные методы обработки: предварительную вырезку «домика» пазов проводить различными производительными методами вырезки, а окончательную обработку – методом чистового профильного протягивания, что позволит существенно на 50 % сократить время и затраты на изготовление, настройку и переточку большого числа предварительных

многосекционных прорезных протяжек из дорогостоящих быстрорежущих сталей

В качестве методов предварительной прорезки «домика» пазов предлагается использовать известные в моторостроении методы глубинного шлифования, фрезерования, электроэрозионной и гидроабразивной обработки [3 – 5, 8, 9, 10]. При этом основная работа (80 %) по удалению металла дисков из пазов глубиной около 20 мм ложится на вырезку «домика», а на чистовую профильную протяжку с припуском 1,5...3 мм остается только 20 % работы. Качество поверхностного слоя и точность формирования елочных пазов обеспечивается теми же окончательными профильными протяжками, которые своими первыми режущими зубьями врезаются в предварительно сформированный домик паз.

### Методика проведения работы

На первом этапе работы для проведения сравнительных исследований эффективности применения новой совмещенной технологии изготовления елочных пазов в дисках турбин на АО «ОДК – Пермские моторы» предусмотрено провести предварительные расчеты трудоемкости и затрат производства, которые могут возникнуть при сравнительных испытаниях следующих совмещенных вариантов обработки елочных пазов в дисках турбин:

1. Предварительное глубинное шлифование «домика» и финишное протягивание (предложение фирмы «Елб-Шлифф», Германия);

2. Предварительная электроэрозионная прорезка «домика» и финишное протягивание (предложение АО «ОДК-Сатурн», г. Рыбинск, ММПП «Салют», г. Москва);

3. Предварительное фрезерование «домика» и финишное протягивание (предложение фирмы Вальтер, Германия).

4. Предварительная гидроабразивная вырезка «домика» и финишное протягивание (предложение ПНИПУ и АО «ОДК-ПМ», г. Пермь);

5. Сравнение проводится с базовым серийным вариантом предварительного и окончательного протягивания елочных пазов.

Для расчетов оборудование, инструменты и режимы обработки принимались из

имеющихся на предприятии станков, оснастки и производственного опыта.

На втором этапе исследований проводился сравнительный анализ расчетов трудоемкости и затрат на предварительную вырезку всех 110 «домиков» одного диска и выбирался наименее трудоемкий и менее затратный способ предварительной прорезки паза.

На третьем этапе исследований выполнялись эксперименты по прорезке пазов выбранным наиболее эффективным методом на конкретном оборудовании с отработкой режимов и контролем полученного профиля «домика», и последующим протягиванием окончательными профильными протяжками.

Для проведения экспериментов подготовлены призматические образцы 150×150×36 мм из жаропрочного деформируемого никелевого сплава ЭИ698-ВД, применяемые на производстве для контроля и сдачи протяжек (рис. 3, а) с отверстиями для крепления на станке и разработан эскиз паза – «домика» для предварительной вырезки паза (рис. 3, б) с расчетом размеров для свободного вписывания в контур елочного профиля и предотвращения разрушения окончательных елочных протяжек.

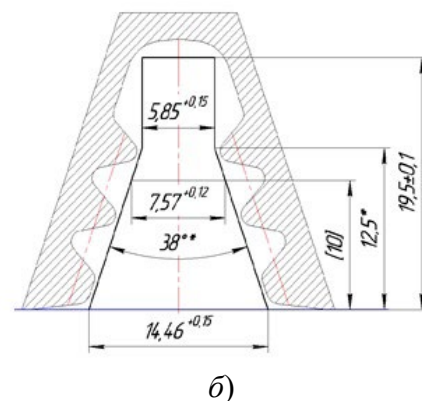
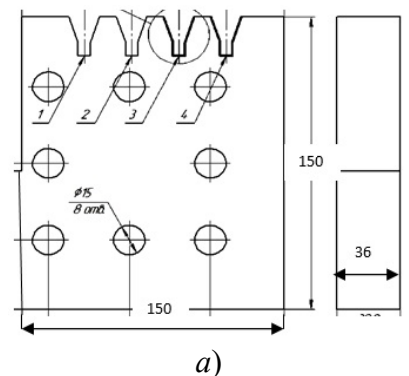


Рис. 3. Эскиз образца для предварительной и окончательной прорезки паза (а) и эскиз предварительного вырезанного «домика», вписанного в чистовой профиль елочного паза (б)

При разработке эскиза «домика» ориентировались на седьмую стадию предварительного протягивания по существующей технологии (см. табл. 1) с оставленным припуском 2...5 мм на окончательную обработку елочного профиля пазов чистовыми секциями протяжек (8...15 стадии протягивания в табл. 1). На каждом образце обрабатывалось по восемь пазов. Затем проводился контроль пазов и последующая чистовая обработка окончательными протяжками.

Контроль точности предварительно обработанного «домика» и окончательно протянутого елочного профиля на образцах проводился с помощью применяемого на предприятии компьютерного профильного проектора ST-1000 (рис. 4) с автоматической обработкой и записью результатов по специальной программе контроля. Параметры качества поверхностного слоя елочного паза не исследовались, т. к. предполагалось, что качество поверхностного слоя пазов после чистового протягивания окончательными протяжками остается на прежнем уровне.



Рис. 4. Общий вид измерения точности елочных пазов в образцах дисков турбин на профильном компьютерном проекторе ST-1000

#### Анализ результатов исследований

На первом этапе проведено сравнение различных методов предварительной обработки «домика» елочных пазов путем проведения расчетов эффективности этих технологий.

**Расчет эффективности, применяемой базовой технологии предварительного протягивания «домика» пазов.** Для расчета принято, что предварительная обработка «домика» пазов проводится по серийному технологическому процессу протягивания пазов диска из

сплава ЭИ698 ВД с числом пазов 110 на горизонтально-протяжном станке модели 7А540 двумя блоками протяжек за два перехода. Обработка глубокого паза проводится по генераторной схеме резания с первой по седьмую позицию (см. табл. 1). Применяются быстрорежущие протяжки из P12Ф2К5М3 на скорости протягивания 2,5 м/мин с длиной хода протяжки 2,0 м. В результате расчета трудоемкость предварительного протягивания 110 пазов с учетом установки, снятия, настройки восьми протяжек в двух блоках составила 373 мин. Стоимость предварительного комплекта протяжек 600000 руб. Стойкость этих протяжек два диска турбины. Число переточек протяжек 4...5.

**Расчет эффективности обработки «домика» пазов диска методом глубинного шлифования.** Для расчета эффективности принято обработку проводить на имеющемся на предприятии станке модели ELB MICRO CUT 4.520 RT за пять проходов с непрерывной правкой круга профильным алмазным роликом. С учетом длины паза и длины врезания и перебега при диаметре круга 500 мм длина рабочего хода L составит 159 мм. Скорость стола с подготовкой принята 50 мм/мин. Глубина резания по проходам составляет соответственно: 6,5; 5,0; 4,0; 3,0; 1,0. Скорость непрерывной правки  $v_{пр} = 0,2$  мкм/об. круга, тогда износ круга по радиусу на 1,0 мм рабочего хода составляет 0,0025 мм, износ круга на все 110 пазов диска составит 220 мм. Тогда при обработке всех в пазов одном диске потребуется три круга диаметром 500 мм. Цена одного круга отечественного производства составляет 1600 руб. (завод «Ильич»). Общее время обработки одного паза за пять проходов с подачей 50 мм/мин составит 16 мин; общее время обработки 110 пазов с учетом времени поворота диска для обработки следующего паза составит 1815 мин или 32 ч.

**Расчет эффективности обработки «домика» пазов диска электроэрозионным методом.** Для электроэрозионной вырезки пазов выбран имеющийся на предприятии электроэрозионный проволочно-вырезной станок Ажикут 320. Здесь в качестве электрода-инструмента используется латунная твердая проволока без покрытия  $\varnothing 0,25$  мм марки HQW250 (производитель Sodick).

Общее время вырезки одного паза (длина реза составляла 68 мм) за три и четыре прохода

составляет соответственно 53 мин и 63 мин. Общее время вырезки за семь проходов составляет 88 мин. Шероховатость поверхности удовлетворяет требованиям чертежа после электроэрозионной вырезки за три прохода. Точность обработки – ± 3,0 мкм. Общее время обработки всех 110 пазов за три прохода составило 1070,5 мин, или 18 ч.

**Расчет эффективности обработки «домика» пазов диска методом фрезерования.** Для фрезерования пазов выбран универсальный горизонтально-фрезерный станок модели 6М83Н и дисковая двухугловая фреза с пластинками твердого сплава. Обработка ведется за два прохода. Предварительно из опыта предприятия установлено, что стойкость такой фрезы составит не более 40 проходов или 20 пазов, поэтому необходимо использовать три фрезы на все пазы одного диска. Общее штучное время обработки 110 пазов одного диска при длине прохода 60 мм с подачей 10 мм/мин при двух проходах, переустановках и настройках инструментов составило 1452, 5 мин или 24 ч.

**Расчет эффективности гидроабразивной вырезки «домика» пазов.** Пазы на гидроабразивной установке фирмы DeKartW1313L обрабатывались на следующих режимах:

давление жидкости: 4075 атм; подача режущей головки 30 мм/мин. В качестве абразива использовался гранатовый песок. Расход абразива: 300 г/мин. Время на обработку одного паза длиной контура 46,25 мм 1,5 мин, с учетом настройки, установки, поворота время прорезки всех 110 пазов составит 211,5 мин. При этом расход абразива на один диск составит 63450 г или 65,5 кг. Потребление воды в абразивно-жидкостном режущем устройстве 3,4 л/мин. При уменьшении скорости подачи головки до 14 мм/мин общее время прорезки пазов составит 524 мин.

Для анализа и выбора наиболее эффективного варианта предварительной обработки паза в форме «домик» в дисках турбин полученные результатов расчета сведены в табл. 2. Анализ табл. 2 показывает, что применение вместо операции предварительного протягивания «домика» других методов обработки приводит к существенному росту трудоемкости: при глубинном шлифовании в 3,35 раза; при фрезеровании 3,73 раза; при электроэрозионной обработке (ЭЭО) в 2,87 раза; при ГАО при подаче 14мм/мин в 1,5 раза; при подаче головки 30 мм/мин время вырезки даже меньше в 1,5 раза.

## 2. Показатели эффективности различных вариантов предварительной прорезки «домика» пазов в диске турбины

Показатели	Протягивание	Шлифование	Фрезерование	Электроэрозия	Гидроабразив
Время обработки	373 мин	1252 мин	1452 мин	1070 мин	524,6 мин (подача 14 мм/мин) 211,5 мин (подача 30 мм/мин)
Затраты на расход инструмента	0,5 комплекта протяжек, 500000 руб.	3 круга – 4800 руб./диск	1 фреза на диск 2000 руб. фреза на диск + 5 переточек – 2000 руб.	Расход проволоки 84 м/диск	Расход абразива 65,5 кг /диск 2620 руб./диск
Затраты на станок	Станок 7А540 или 7Б57 850 тыс.руб.	Станок МикроКат-4 28 млн. руб.	Станок 6М83Н; 300.000 руб.	Станок Ажикут 320; 48 млн. руб.	DeKartW1313L 2,1 млн рублей.

**Результаты экспериментальных исследований новой технологии обработки елочных пазов**

В результате анализа сравнительных данных эффективности различных вариантов обработки (табл. 2) выбран метод гидроабразивной обработки и принято решение провести экспериментальные исследования новой технологии обработки елочных пазов в дисках турбин путем предварительной вырезки «домика» методом гидроабразивной обработки на гидроабразивной установке DeKartW1313L (рис. 5) при давлении жидкости 4075 атм, подаче головки 30 мм/мин с гранатовым песком и последующем окончательном протягивании профильными чистовыми протяжками.



**Рис. 5. Гидроабразивная установка DeKartW1313L с ЧПУ для вырезки пазов**

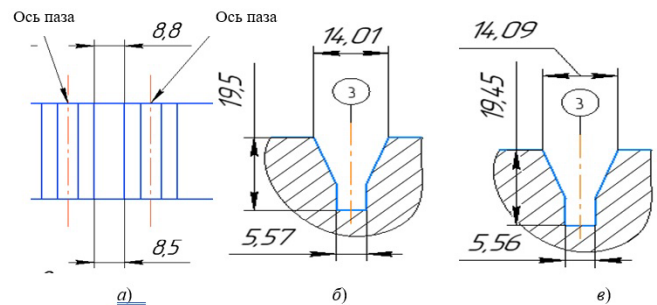
Особенности гидроабразивной резки заключаются в том, что в качестве режущего инструмента используется струя смеси воды и абразивного материала, выпускаемая управляемой ЧПУ гидроголовкой с высокой скоростью и под высоким давлением. Применение гидроабразивной резки для обработки предварительного паза является наиболее перспективным. Этот вид обработки имеет наименьшую трудоемкость из всех рассмотренных способов, а также достаточно существенно может удешевить производство елочных пазов по существующему технологическому процессу.

В результате экспериментальных исследований процесса прорезки гидроабразивом установлено, что при движении струи гидроабразива вдоль вырезаемого паза температура обрабатываемых деталей не изменяется. Микронагрев, вызываемый отделением стружки абразивной частицей, устраняется потоком суспензии, сопровождающим эту абразивную частицу. Небольшая сила давления гидроструи (1...100 Н) и температура (+ 60...+ 90 °С) в зоне

резания исключают деформацию заготовки, оплавление и пригорание материала в прилегающей зоне.

С помощью программы ЧПУ режущая головка с гидроструей жидкости шириной реза 0,2...3,0 мм движется плавно без вибрации, как точечный инструмент по всем поверхностям сложной формы паза и скосам под нужным углом. При этом точность резки по координатам составила 0,01 мм. Мелкая стружка в виде пыли не разбрасывается, а смывается и скапливается на дне бака с водой, гасящей гидрострую.

Одновременно установлено нежелательное появление так называемой конусности паза – при прохождении через толщу материала гидроструя ослабевает, в результате чего на выходе ширина паза меньше, чем на входе. Увод размеров паза по ширине вследствие падения давления приводит к появлению разницы размеров паза на входе струи в заготовку и на выходе. На рис. 6 представлены результаты измерений пазов, полученных на гидроабразивной установке на входе режущей головки и на выходе.



**Рис. 6. Результаты измерений пазов, полученных на гидроабразивной установке:**

*а* – на виде сверху; *б* – на входе струи гидроабразива в паз; *в* – на выходе из паза

На виде сверху (см. рис. 6, *а*) по размерам межпазового выступа на входе 8,5 мм и на выходе 8,8 мм видно, что увод профиля пазов после гидроабразивной резки получился в пределах 0,15 мм на сторону. В поперечном сечении на рис. 6, *б* и рис. 6, *в* также можно видеть увод струи гидроабразива по ширине дна паза и по высоте паза от 0,01 до 0,05 мм. Однако этого припуска вполне достаточно для обеспечения получения годного елочного профиля при протягивании окончательными протяжками.

Проверка полученного при гидроабразивной обработке профиля на компьютерном



проекторе показала (рис. 7), что профиль вырезанного паза с учетом измеренного увода профиля находится в поле допуска перед чистовым елочным профилем окончательной протяжки, что говорит о пригодности вырезанного гидроабразивным методом паза к окончательному протягиванию.

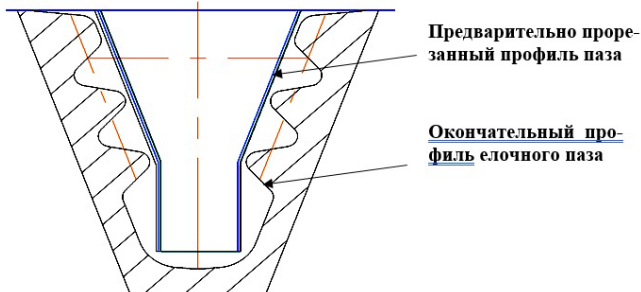


Рис. 7. Результаты измерений на профильном компьютерном проекторе ST-1000 предварительного вырезанного паза («домика») методом ГАО и вписывание его чертежные размеры елочного профиля для окончательного протягивания

На фотографии предварительно обработанных пазов в образцах (см. рис. 8) видно, что пазы после вырезки на гидроабразивной установке получились достаточно ровными, имеют небольшие зарезы по углам доньшка паза и на клиновой части, но в пределах допуска на окончательный профиль. По результатам измерений пазов после вырезки на гидроабразивной установке в отделе технического контроля (ОТК) предприятия полученные образцы пазов признаны годными и получено разрешение к проведению окончательного протягивания елочных пазов.

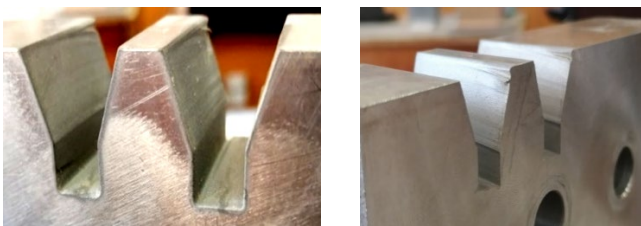


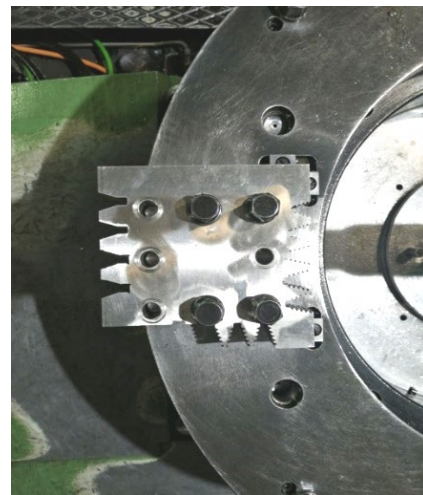
Рис. 8. Фотография образца с вырезанными предварительным профилем пазами

Протягивание елочного паза окончательными протяжками. Для проведения окончательного протягивания елочных пазов, предварительно вырезанных на гидроабразивной установке, предприятием предоставлен новый более жесткий горизонтально-протяжной станок фирмы Hoffmann RAWMX 25×6300 с ЧПУ и длиной хода 10 м (рис. 9, а). Образцы с

предварительно обработанными пазами устанавливались на штифтах по специальным отверстиям на станине станка и прочно закреплялись (рис. 9, б).



а)



б)

Рис. 9. Общий вид протягивания пазов после предварительной вырезки «домика» паза на горизонтально-протяжном станке RAWMX 25×6300 фирмы HOFFMANN с ЧПУ (а) и установки образцов для протягивания пазов на станке (б)

При протягивании окончательного елочного профиля использовался весь комплект предварительных и окончательных протяжек для безопасности эксперимента и предотвращения разрушения окончательных протяжек. Первые шесть предварительных протяжек прошли по воздуху в прорезанном предварительно «домике» не снимая стружки, а работать начала только седьмая предварительная протяжка своими последними чистовыми зубьями и все последующие окончательные чистовые елочные протяжки. Преимущество станка RAWMX 25×6300 фирмы HOFFMANN с ЧПУ заключается еще в том, что все секции

предварительных и окончательных протяжек вошли в один длинный протяжной блок. В результате протягивание осуществлялось за один ход протяжного блока вместо четырех проходов на универсальном станке 7А540. Протянутые образцы с елочными пазами поступили в ОТК предприятия и прошли тщательную проверку соответствия качества и точности полученных елочных пазов согласно заводским инструкциям.

Результаты контроля протянутого елочного паза на профильном проекторе ST-1000 сформированы в виде актов замера по всем размерам елочного профиля полученных пазов по новой технологии совмещенной обработки – предварительная прорезка «домика» гидроабразивом и окончательное протягивание профиля паза. На фотографиях (рис. 10) представлены пазы в образцах, протянутые предварительно и окончательно.



Рис. 10. Фотография образца с вырезанными предварительным и окончательным профилем пазами

По результатам электронного контроля установлено, что все основные размеры профиля елочных пазов получены в пределах допуска и являются годными по ТУ. Предложено провести дальнейшую экспериментальную работу на конкретных серийных дисках турбин, чтобы принять решение о внедрении новой технологии в серийное производство.

## Общие выводы

1. Анализ существующих альтернативных технологий выявил наиболее целесообразное решение – применение предварительной гидроабразивной обработки (ГАО) «домика» и последующая окончательная обработка протягиванием.

2. Установлено, что процесс гидроабразивной резки может быть использован для предварительной вырезки «домика» елочного паза. Применение гидроабразивной резки является перспективным, этот вид обработки имеет наименьшую трудоемкость из всех рассмотренных способов, а также существенно может удешевить производство елочных пазов по существующему технологическому процессу.

3. Основным преимуществом ГАО является независимость от физико-механических свойств жаропрочных никелевых сплавов.

4. Современное оборудование для ГАО обеспечивает высокую точность обработки с относительно высокой производительностью.

5. Внедрение ГАО позволяет обеспечить высокую технологическую гибкость (особенно при освоении новых изделий с относительно невысокими затратами).

6. Высокая производительность ГАО до  $300 \text{ мм}^2/\text{мин}$  со скоростью  $30 \text{ мм}/\text{мин}$  обеспечивает высокую скорость вырезки пазов в дисках турбин, не уступающую процессу протягивания.

7. Внедрение предварительной гидроабразивной обработки (ГАО) «домика» и последующей окончательной обработки протягиванием позволит существенно сократить расход предварительных протяжек и с учетом резко возрастающим производством газотурбинных двигателей существенное снижение себестоимости изделий.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Иноземцев А.А.** Авиационный двигатель ПС-90А: А.А. Иноземцев и др., М.: Либра-К, 2007. 320 с.
2. **Макаров В.Ф.** Оптимизация протягивания труднообрабатываемых материалов: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2014. 437 с.
3. **Макаров В.Ф.** Резание материалов: учебник. Старый Оскол: ТНТ, 2022. 468 с.
4. **Макаров В.Ф.** Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов: Учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2013. 320 с.

5. Шманев В. А. и др. Струйная гидроабразивная обработка деталей ГТД / В. А. Шманев, А. П. Шулепов, А. В. Мцветков. М.: Машиностроение, 1995. 144 с.

6. Балюра П.Г. Протягивание пазов. Машиностроение, 1964. 171 с.

7. Пронкин Н.Ф. Протягивание труднообрабатываемых материалов. М.: Машиностроение, 1978. 119 с.

8. Полетаев В.А., Цветков Е.В., Волков Д.И. Автоматизированное производство лопаток ГТД: Библиотека технолога. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 262 с.

9. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С.С. Силин [и др.]. М.: Машиностроение, 1984. 64с.

10. Макаров В.Ф., Никитин С.П. Повышение эффективности профильного глубинного шлифования лопаток турбин на многокоординатных станках с ЧПУ // Научно-технические технологии машиностроения. 2018. № 4 (82). С. 21–28.

## REFERENCES

1. Inozemtsev A.A. Aircraft engine PS-90A: A.A. Inozemtsev and others, M.: Libra-K, 2007. 320 p.

2. Makarov V.F. Optimization of broaching of hard-to-cut materials: monograph / V.F. Makarov. Stary Oskol: TNT, 2014. 437 p.

3. Makarov V.F. Cutting materials: textbook / V.F. Makarov. Stary Oskol: TNT, 2022. 468 p.

4. Makarov V.F. Modern methods of highly efficient abrasive treatment of heat-resistant steels and alloys: Textbook. St. Petersburg: Publishing house «Lan», 2013. 320 p.

5. Shmanev V. A., et al., Shmanev, V. A., Shulepov, A. P., and Mtsvetkov, A. V. Water jet treatment of GTE parts, Moscow: Mashinostroenie, 1995. 144 p.

6. Balura P.G. Pulling grooves / P.G. Balura. Mashinostroenie, 1964. 171 p.

7. Pronkin N.F. Pulling of hard-to-cut materials / N.F. Pronkin. M.: Mashinostroenie, 1978. 119p.

8. Poletaev V.A., Tsvetkov E.V., Volkov D.I. Automated production of GTE blades: Technologist's Library. M.: Innovative engineering, 2016. 262 p.

9. Deep grinding of parts from difficult-to-machine materials / S.S. Silin [i dr.]. M.: Mashinostroenie, 1984. 64 p.

10. Makarov V.F. Improving the efficiency of profile deep grinding of turbine blades on multi-axis CNC machines. / Makarov V.F., Nikitin S.P. // Science-intensive engineering technologies, 2018, no. 4 (82), pp. 21–28.

**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 06.04.2023; одобрена после рецензирования 18.04.2023; принята к публикации 28.04.2023.

The article was submitted 06.04.2022; approved after reviewing 18.04.2022; assepted for publication 28.04.2023.

