

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

На правах рукописи



Норин Александр Олегович

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ТОЧНОСТИ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ СОПЛОВЫХ АППАРАТОВ ЗА СЧЕТ
КОРРЕКТИРУЮЩЕГО ШЛИФОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛОПАТОК, СОРИЕНТИРОВАННЫХ ПО ПЛОЩАДИ
ПРОХОДНОГО СЕЧЕНИЯ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор

Макаров Владимир Федорович

Пермь – 2026

Содержание

Введение.....	4
Глава 1. Состояние вопроса. Цель и задачи работы.....	13
1.1 Конструкторско-технологические требования, предъявляемые к изготовлению сопловых лопаток и сборке сопловых аппаратов.....	13
1.1 Проблемы производительности и точности изготовления сопловых лопаток и сборки соплового аппарата с обеспечением требуемой площади проходного сечения соплового аппарата.....	19
1.2 Анализ научных исследований технологии обработки сопловых лопаток и сборки сопловых аппаратов.....	22
1.3 Особенности глубинного шлифования установочных поверхностей лопатки на станках с ЧПУ	30
1.3.1 Шлифовальные станки с ЧПУ, используемые при глубинном шлифовании.....	32
1.3.2 Режущий инструмент, используемый при глубинном шлифовании.....	38
1.3.3 Понятие о процессе глубинного шлифования лопаток турбин.....	45
1.4 Анализ методов контроля проходного сечения соплового аппарата	46
1.5 Анализ особенностей создания специального программного обеспечения управления технологическим процессом.....	61
Выводы по главе 1	62
Глава 2. Обоснование возможности повышения производительности и точности обработки и сборки сопловых аппаратов на основе применения оптического контроля и корректирующего глубинного шлифования сопловых лопаток	66
2.1 Теоретическая обоснование возможности компенсации погрешности пера сопловой лопатки путём разворота на расчётный угол	66
2.2 Установление взаимосвязи между углом разворота и общей площадью проходного сечения соплового аппарата.....	70
2.3 Разработка алгоритмов и этапов подготовки, а также расчёт общей площади проходного сечения соплового аппарата для комплекта сопловых лопаток.....	72
Выводы по главе 2	90

Глава 3. Разработка методического обеспечения экспериментального исследования новой технологии повышения производительности и точности изготовления сопловых лопаток и сборки сопловых аппаратов	92
3.1 Выбор и характеристика оборудования для проведения исследования.....	92
3.2 Выбор режущих инструментов и режимов резания для проведения исследования	98
3.3 Выбор деталей для проведения исследования	100
3.4 Выбор измерительного прибора для проведения оптического контроля и анализа результатов исследования	102
Выводы по главе 3	105
Глава 4. Анализ результатов экспериментальных исследований эффективности применения новой технологии.....	107
4.1 Сопоставление графиков оценки эффективности новой технологии и разработки технологических рекомендации по внедрению в производство	107
4.2 Результаты практической реализации новой технологии по повышению производительности, а также точности изготовления сопловых лопаток и сборки сопловых аппаратов турбин	121
Выводы по главе 4	122
Заключение	125
Список сокращений и условных обозначений.....	127
Список использованных источников	129
Приложение 1	148
Приложение 2	149
Приложение 3	150
Приложение 4	151

Введение

Актуальность темы исследования. В настоящее время возросла потребность Российской Федерации в увеличении производства современных отечественных самолётов и газотурбинных двигателей для гражданской авиации. В связи ростом объёма производства отечественных магистральных самолётов, таких как ТУ-214, Sukhoi Superjet 100 New и МС-21-310, необходимо увеличить объём выпускаемых отечественных газотурбинных двигателей, таких как ПС-90А, ПД-8 и ПД-14 и др. Необходимо нарастить объёмы производства газотурбинных двигателей с применением новых технологий, которые обеспечат высокую производительность, качество, точность, а также повысят стабильность выходных параметров собранных узлов газотурбинного двигателя.

Турбина является одним из ключевых узлов газотурбинного двигателя, оказывающая влияние на параметры всего двигателя. Одной из важных частей турбины является сопловой аппарат и лопатки, из которых он состоит. Несовершенство технологии изготовления сопловых лопаток связано с нестабильностью процесса литья лопаток и длительностью процесса доводки литейной оснастки. Другой проблемой является высокая трудоёмкость механической обработки сопловых лопаток. И в дополнение к вышеперечисленным проблемам при сборке сопловых лопаток в узел не обеспечивается площадь проходного сечения соплового аппарата.

Установлено, что основной причиной несоответствия общей площади проходного сечения соплового аппарата [82] при сборке являются отклонение геометрии профиля пера сопловых лопаток, полученное в процессе литья по выплавляемым моделям. При этом фактические отклонения профиля пера лопатки от конструкторской геометрии находится в заданном допуске $\pm 0,3$ мм, что обеспечивает удовлетворение требований к процессу литья лопаток.

Процесс изготовления сопловых лопаток и сборки соплового аппарата газовых турбин является весьма трудоёмким, что сдерживает выполнение задач

по увеличению объёма изготовления газотурбинных двигателей как в России, так и за рубежом.

С появлением новых многокоординатных шлифовальных станков с ЧПУ представилась возможность повысить производительность и точность обработки сопловых лопаток за счёт автоматизации процесса шлифования сопловых лопаток, а также реализовать возможность корректировки положения пера лопатки, тем самым обеспечить требуемую площадь проходного сечения соплового аппарата после сборки.

Большая трудоёмкость существующей технологии и низкая точность изготовления сопловых лопаток и сопловых аппаратов связаны в том числе с корректной обработкой установочных поверхностей лопатки, которые шлифуются последовательно на нескольких плоскошлифовальных станках, а радиальные поверхности обрабатываются на модернизированных токарно-лобовых станках с ручной настройкой и управлением. При этом серийная технология обработки сопловых лопаток не учитывает фактические отклонения геометрии пера лопатки, полученные в процессе литья.

В результате при контроле площади проходного сечения соплового аппарата после сборки и выявления превышения допустимого допуска приходится отправлять сопловой аппарат на доработку в механический цех, где приходится повторно разбирать, выполнять ручную слесарную доводку и полировку лопаток, вновь выполнять селективную переборку лопаток и отбраковку части лопаток, а затем повторно собирать, ещё раз контролировать площадь проходного сечения соплового аппарата. При этом появляются непредвиденные простои производства при сборке газотурбинного двигателя, что является недопустимым в условиях возросшего роста объёма производства двигателей.

Ещё одним сдерживающим фактором является высокая трудоёмкость ручного контроля как единичных сопловых лопаток, так и контроль общей площади проходного сечения соплового аппарата. Установлено, что процесс

ручного контроля размеров, позволяющих оценить площадь проходного сечения единичного межлопаточного окна в сопловом аппарате, весьма трудоёмка и имеет низкую сходимостъ результатов контроля размеров в механическом и сборочном цехе. По данным размерам выполняется оценка соответствия площади проходного сечения единичного межлопаточного канала соплового аппарата требуемому значению, указанному в конструкторской документации.

Появление современных средств контроля геометрии деталей и сборочных единиц (узлов) с применением методов контроля деталей с помощью координатно-измерительной машины (контактный метод измерения) позволяет автоматизировать контроль деталей. Благодаря применению оптической системы ATOS (бесконтактный способ измерения) появилась возможность в новом технологическом процессе автоматизировать контроль геометрии сопловых лопаток и собранного узла (соплового аппарата), снизить трудоёмкость операций контроля и повысить точность, а также сходимостъ результатов измерения в механическом и сборочном цеху.

Использование новых автоматизированных многоосевых шлифовальных станков с ЧПУ и оптических методов для решения проблем повышения производительности, точности и обеспечения площади проходного сечения соплового аппарата позволяет на этапе обработки базовых поверхностей сопловой лопатки выполнять корректировку базовых поверхностей лопатки относительно её пера.

В результате чего появляется возможность управлять общей площадью проходного сечения соплового аппарата, то есть становиться, возможно обеспечить требуемое значение общей площади проходного сечения соплового аппарата в заданном поле допуска после сборки сопловых лопаток в узел.

Однако пока эти проблемы не решены практически в производстве и в научном плане.

Поэтому разработка нового технологического процесса по повышению точности сопловых лопаток и сборки из них сопловых аппаратов с обеспечением

требуемой площади проходного сечения соплового аппарата является весьма актуальной научной задачей.

Работа выполнена в рамках договора между ФГБОУ ВПО «ПНИПУ» и АО «ОДК-Авиадвигатель» постановления Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. N 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора экономики в целях реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичных производств».

Степень разработанности. Вопросами разработки и совершенствования процесса глубинного шлифования лопаток на многоосевых станках с ЧПУ занимались учёные Силин С.С., Полетаев В.А., Волков Д.И., Безъязычный В.Ф., Рыкунов Н.С., Драпкин Б.М., Суслова А.Г., Крылов В.И., Носенко В.А., Леонов Б.И., Сулима А.М., Хрульков В.А., Прокофьев М.А., Шумячер В.М., Романова В.Л. и др.

Разработкой новых шлифовальных кругов и область их применения занимались Старков В.К., Бакуль В.Н., Ваксер Д.Б., Рябцев С.А., Воронин В.Н., Горин Н.А. и др.

Выбором оптимальных режимов глубинного шлифования занимались Волков Д.И., Макаров В.Ф., Семиколенных В.В., Никитин С.П., Кирчанов В.П., Попов А.Н. и др. Однако в их трудах не рассмотрен вопрос комплексного обеспечения параметров точности как единичной сопловой лопатки, так и соплового аппарата в целом после сборки.

Целью работы является повышение производительности и точности изготовления сопловых аппаратов за счет корректирующего шлифования контактных поверхностей лопаток, сориентированных по площади проходного сечения производительности и точности изготовления сопловых аппаратов за счёт новой технологии корректирующего шлифования.

Задачи исследования:

1. Провести комплексный анализ существующих проблем низкой

производительности и точности изготовления и сборки сопловых аппаратов;

2. Теоретически обосновать возможность повышения производительности и точности изготовления соплового аппарата путём применения оптического контроля и корректирующего глубинного шлифования на станке с ЧПУ;

3. Установить регрессионную зависимость изменения общей площади проходного сечения соплового аппарата в зависимости от угла разворота сопловых лопаток для коррекции отклонения геометрии пера лопаток;

4. Разработать специальное программное обеспечение для расчёта угла разворота сопловых лопаток;

5. Разработать алгоритм выполнения нового технологического процесса с использованием специального программного обеспечения (СПО);

6. Разработать методику проведения экспериментальных исследований для оценки эффективности новой технологии изготовления сопловых лопаток и сборки соплового аппарата;

7. Провести экспериментальные исследования эффективности новой технологии;

8. Внедрить на производстве АО «ОДК-Авиадвигатель» (г. Пермь) новую технологию изготовления сопловых лопаток и сборки сопловых аппаратов.

Научная новизна:

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность управления величиной суммарной площади проходного сечения собираемого соплового аппарата за счёт изменения пространственного расположения сопловых лопаток на финишной операции механической обработки основных конструкторских базовых поверхностей сопловых лопаток, что позволяет исключить многократную пересборку узла и обеспечить выполнение требований в отношении суммарной площади проходного сечения соплового аппарата с первого раза.

2. Выявлена и количественно описана взаимосвязь между изменением суммарной площади проходного сечения соплового аппарата и величиной

корректирующего угла разворота сопловых лопаток при установке на финишной операции механической обработки основных конструкторских поверхностей сопловых лопаток. Определены предельные значения величины корректирующего угла в диапазоне ± 1 угловой градус от номинального положения обрабатываемой заготовки, при которых гарантированно соблюдается достаточность припуска на обработку, а изменение угла в этом диапазоне является достаточным для обеспечения допуска на общую площадь проходного сечения соплового аппарата.

3. На основе выявленных взаимосвязей разработана методика формирования цифрового двойника сопловой лопатки, включающая алгоритм виртуальной сборки узла, оценки общей площади проходного сечения соплового аппарата и расчёта величины угловой коррекции до финишной обработки с целью обеспечения технических требований на суммарную площадь проходного сечения соплового аппарата в результате однократной сборки.

Теоретическая значимость работы. Заключается в достоверном прогнозировании общей площади проходного сечения соплового аппарата до начала механической обработки установочных баз сопловой лопатки на шлифовальном станке с ЧПУ.

Практическая значимость работы.

1. Впервые разработан технологический процесс изготовления сопловых лопаток, который учитывает отклонения реального профиля пера отлитых сопловых лопаток с применением автоматизированного корректирующего глубинного шлифования на многоосевом шлифовальном станке с ЧПУ.

2. Разработаны технологические рекомендации и алгоритм работы технолога в рамках технологической подготовки производства сопловых лопаток.

3. Создано специальное программное обеспечение, которое позволило автоматизировать процесс расчёта корректирующего угла разворота для комплекта сопловых лопаток [62, 63].

4. Получен патент на способ обработки радиальной торцевой канавки на детали газотурбинного двигателя (патент РФ на изобретение № 2648174 от

06.06.2017).

Новая технология обработки сопловых лопаток внедрена на предприятии АО «ОДК-Авиадвигатель», с помощью которой обработано 1520 сопловых лопаток. Результаты, полученные в диссертационной работе, используются в учебном процессе ПНИПУ.

Методология и методы исследования. В работе использовались научные основы технологии машиностроения, теория глубинного шлифования, теории измерений и контроля погрешностей, теории вероятности, математической статистики и регрессионный анализ. При выполнении экспериментальных исследований использовалось современное оборудование: пятиосевой профилешлифовальный станок с ЧПУ фирмы «Mägerle» модели MFP-050.65.65, бесконтактный оптический измерительный комплекс ATOS III. Обработка экспериментальных данных и математические расчёты выполнялись в специальном программном обеспечении на персональном компьютере с использованием стандартных программ: NX и C++.

Положения, выносимые на защиту.

1. Новый технологический процесс, в котором используется конструкторская база, которой является мнимая ось сопловой лопатки.
2. Регрессионная зависимость, позволяющая рассчитать и прогнозировать общую площадь проходного сечения соплового аппарата в зависимости от угла разворота лопаток.
3. Технологические рекомендации и алгоритм работы технолога в рамках технологической подготовки производства сопловых лопаток.
4. Специальное программное обеспечение, которое позволило автоматизировать процесс расчёта корректирующего угла разворота для комплекта сопловых лопаток.
5. Результаты экспериментальных исследований эффективности новой технологии.

Степень достоверности результатов. Подтверждается совпадением

разработанных теоретических положений и алгоритмов работы с результатами проведённых экспериментальных исследований.

Личный вклад автора. Соискателю принадлежит ключевая роль в процессе постановки задачи, проведения экспериментальных исследований, тестирования и отладки СПО, а также в анализе и интерпретации полученных результатов, формулировании выводов.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на Международных и Всероссийских научно-технических конференциях: XVI Всероссийская научно-техническая конференция: «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2015», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, 17 по 18 ноября 2015 г., VIII Международная научно-техническая конференция: «Наукоёмкие технологии на современном этапе развития машиностроения», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, г. Москва, 19-21 мая 2016 г., LXIII научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин и парогазовых установок «Фундаментальные проблемы локализации производства в России деталей горячего тракта ГТУ, использующихся в национальной экономике России», Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт, г. Рыбинск, 20-22 сентября 2016 г., Современные высокоэффективные технологии и оборудование в машиностроении (МТЕТ-2016): труды международной научно-технической конференции, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, 6-8 октября 2016 г., XXIV Всероссийская научно-техническая конференция «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2023» (АКТТИ – 2023), Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, 15-17 ноября 2023 г, XII Всероссийская научно-техническая конференция «Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста», Уфимский университет науки и

технологий, г. Уфа, 16-17 ноября 2023 г.

Работа соответствует паспорту специальности 2.5.6. Технология машиностроения по пунктам: п. 3. «Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения», п. 4. «Совершенствование существующих и разработка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска», п. 7. «Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин», п. 9. «Методы и средства повышения производительности изготовления изделий машиностроения».

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 10 научных работ, в том числе 3 работы в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, входящих в перечень ВАК РФ, 1 работа в научном издании, включённом в базу цитирования Scopus, получен 1 патент на изобретение.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, приложения. Работа изложена на 147 страницах машинописного текста, имеет 76 рисунков, 9 таблиц, 1 формулу. Список использованных источников включает 168 наименований.

Глава 1. Состояние вопроса. Цель и задачи работы.

1.1 Конструкторско-технологические требования, предъявляемые к изготовлению сопловых лопаток и сборке сопловых аппаратов

В современных условиях возросшей потребности в увеличении объёмов выпуска авиационной техники необходимо также наращивать объёмы выпуска газотурбинных двигателей, используя уже имеющиеся производственные мощности.

В связи с этим растёт необходимость пересмотра существующих технологий обработки трудоёмких деталей и узлов газотурбинных двигателей, одним из таких узлов является сопловой аппарат, собранный из комплекта сопловых лопаток. Установлено, что процесс изготовления лопаток тоже весьма трудоёмкий и длительный, что оказывает влияние на сроки изготовления и сборки газотурбинного двигателя.

Современные турбореактивные двигатели типа ПД-8, ПД-14 создаются на базе высокоэффективного газогенератора, который позволит создать газотурбинный двигатель 5-го поколения. К характеристикам современного газотурбинного двигателя предъявляются высокие требования к качеству изготовления деталей и сборочных единиц. Одним из таких сложных узлов газотурбинного двигателя является газовая турбина, в состав которой входит сопловой аппарат, характеристики которой непосредственно оказывают влияние на линию рабочих режимов двигателя [57].

В состав соплового аппарата турбины входят сопловые лопатки, которые формируют требуемую площадь проходного сечения соплового аппарата турбины. Поэтому необходимо обеспечить общую площадь проходного сечения согласно конструкторской документации для обеспечения заданных параметров турбины.

К сопловым лопаткам предъявляются высокие аэродинамические, технологические и эксплуатационные требования, поскольку сопловые лопатки

турбины испытывают высокие температурные и силовые нагрузки от действия газа горячего потока в газотурбинном двигателе (рисунок 1.1). Здесь нужно понимать, что из камеры сгорания выходит поток газа высокой температуры (1000-1400 град.) под высоким давлением направляется на рабочие лопатки турбины, а следом попадает на сопловые лопатки. Отклонение от конструкторской геометрии сопловых лопаток оказывает влияние на газодинамические характеристики потока и на линию рабочих режимов газотурбинного двигателя.

Основным предназначением рабочих лопаток турбины является преобразование давления газа во вращательное движение вала турбины (рисунок 1а), благодаря чему создается тяга газотурбинного двигателя. Основное назначение сопловых лопаток – сжатие и эффективное направление потока газа на рабочие лопатки турбины. Сопловые лопатки (рисунок 1в) установлены между внутренним и наружным кольцом соплового аппарата (рисунок 1б), неподвижно в статоре газотурбинного двигателя [67, 68, 69].

Сопловые лопатки турбины являются одними из наиболее нагруженных, ответственных деталей, которые определяют параметры и линию рабочих режимов газотурбинного двигателя. Ориентировочный ресурс работы лопаток в газотурбинном двигателе составляет:

- для военной авиации – 500...1000 ч;
- для гражданской (транспортной) авиации – 10000...20000 ч.

На надёжность работы сопловых лопаток турбин влияет геометрия лопатки, используемый материал для лопатки, технология изготовления и ряд других факторов, которые оказывают влияние на качество обработанных поверхностей лопатки. В обработанном поверхностном слое образуются остаточные напряжения, в том числе от механической обработки детали. Основными факторами, оказывающими наибольшее влияние на качество поверхностного слоя детали, является шероховатость, глубина наклепа, величина и характер распределения остаточных напряжений, которые зависят от

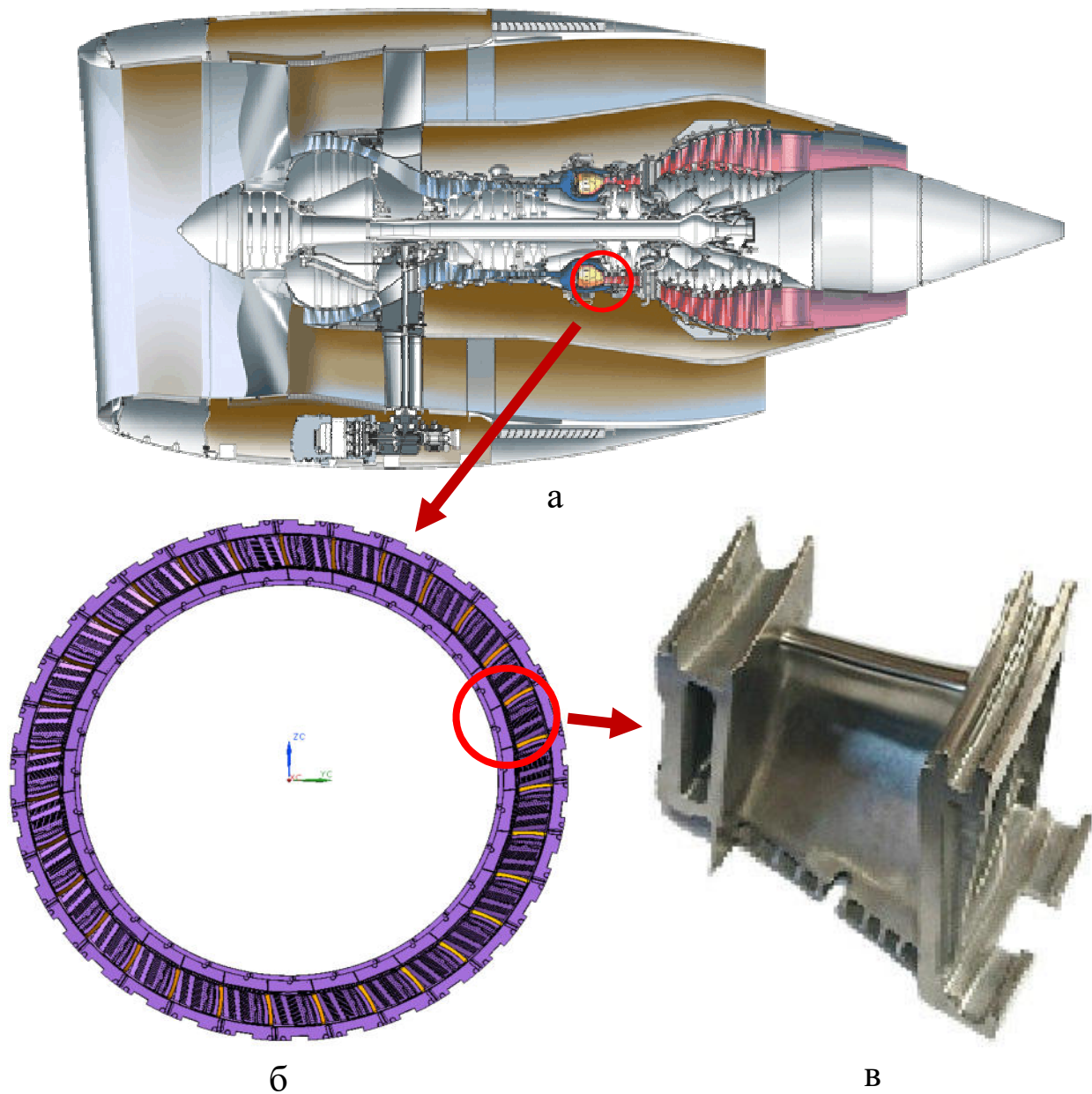


Рисунок 1.1 Общий вид расположения соплового аппарата и сопловых лопаток в газотурбинном двигателе, а – схема ГТД, б – сопловой аппарат, в – сопловая лопатка [8]

физико-химических свойств обрабатываемого материала, из которого изготовлена сопловая лопатка, метода обработки, числа проходов, выбранных режимов шлифования лопатки и параметров правки шлифовального круга, а также от объёма и давления подаваемой смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания.

Качество и точность изготовления сопловой лопатки зависит и от процесса изготовления заготовки лопатки методом литья по выплавляемым моделям,

процесс литья и последующей механической обработки сопловых лопаток является весьма трудоёмким и сложным технологическим процессом, что выражается рядом факторов:

1. Очень сложная геометрическая форма пера и проточной части сопловой лопатки, а также наличие в лопатки внутренней полости сложной формы, часто при охлаждении лопаток приводит к отклонению геометрии пера от конструкторской геометрии;
2. Предъявляются высокие требования к точности и шероховатости обработанных поверхностей лопатки;
3. Наличие регламентированных требований к остаточным напряжениям в поверхностном слое лопатки;
4. Для изготовления применяются труднообрабатываемые жаропрочные сплавы с большим процентным содержанием никеля;
5. Процесс механической обработки весьма трудоёмкий и требует применения широкой номенклатуры плоскошлифовальных станков, большого числа приспособлений и большого количества переустановок;
6. Для изготовления радиальных и установочных поверхностей методом шлифования требуется применение модернизированных токарно-лобовых станков с ручным управлением бакелитовых отрезных кругов и без использования смазочно-охлаждающей жидкости во время обработки;
7. Процесс технологической подготовки производства весьма длительный и включает в себя оснащение производства дорогостоящим специализированным оборудованием для изготовления отливок, механической обработки и последующего весьма трудоёмкого ручного контроля обработанных сопловых лопаток.

В турбине газотурбинного двигателя используются рабочие лопатки, которые совершают вращение и сопловые лопатки, которые устанавливаются в статор. Основное назначение сопловых лопаток — это преобразование потенциальной энергии горячих газов в кинетическую. Поток горячих газов

проходит сквозь межлопаточные каналы, находящиеся между сопловыми лопатками, выравнивается и попадает на рабочие лопатки турбины [14, 37].

Сопловые лопатки турбины изготавливают пустотелыми с установленными во внутренней полости дефлекторами, необходимыми для охлаждения лопатки. На входной кромке сопловой выполнена перфорация лопатки в несколько продольных рядов, обеспечивающая плёночное охлаждение наружной поверхности пера лопатки у входной кромки. В передней и задней полостях сопловой лопатки размещены тонкостенные дефлекторы с отверстиями для выпуска охлаждающего воздуха в зазоры между дефлекторами и внутренней поверхностью лопатки [37]. Для интенсификации теплообмена на внутренней поверхности имеются турбулизирующие штырьки [14].

При установке двух лопаток в сопловой аппарат между ними образуется канал, через который движется газ, размеры которого должны соответствовать требованиям конструкторской документации, а величина площади проходного сечения межлопаточного должна соответствовать требуемому значению чертежа и укладываться в допуск (рисунок 1.2).

Одним из важнейших параметров собранного соплового аппарата является общая площадь проходного сечения соплового аппарата (S_{CA}), так как от неё зависит линия рабочих режимов газотурбинного двигателя [67, 68, 69].

Введём определение, что же понимается под проходным сечением. Проходное сечение соплового аппарата – это суммарная площадь сечений межлопаточных каналов соплового аппарата, предназначенного для обеспечения заданного газового направления потока, движущегося с большой скоростью и высоким давлением и действующего на рабочие лопатки ротора турбины, которые создают крутящий момент на валу газотурбинного двигателя (рисунок 1.2) [14, 37, 67, 68, 69].

Для каждого спроектированного соплового аппарата рассчитывается величина оптимального значения площади проходного сечения как единичного межлопаточного канала (рисунок 1.2), так и общей площади проходного сечения

соплового аппарата. В процессе сборки соплового аппарата из обработанных сопловых лопаток формируется общая площадь проходного сечения соплового аппарата. Эта площадь напрямую зависит от точности литья профиля пера лопаток и того, насколько точно были изготовлены установочные поверхности сопловой лопатки [65].

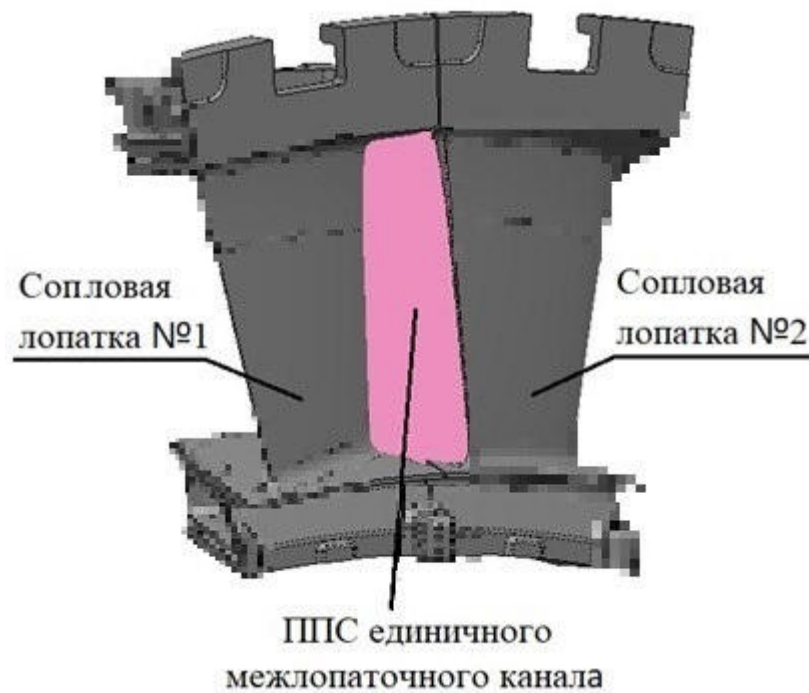


Рисунок 1.2 Схема расположения площади проходного сечения между двумя сопловыми лопатками

В свою очередь, фактическое значение общей площади проходного сечения соплового аппарата оказывает влияние на линию рабочих режимов газотурбинного двигателя. Поэтому после сборки соплового аппарата реальное значение общей площади проходного сечения соплового аппарата должно соответствовать заданной конструктором величине и укладываться в допуск ($\pm 0,5\%$). В процессе анализа существующей серийной технологии установлено, что при точности изготовления пера сопловой лопатки $\pm 0,3$ мм, заданной конструкторами, и достаточно жестком допуске на общую площадь проходного сечения соплового аппарата, практически невозможно обеспечить необходимую общую площадь проходного сечения соплового аппарата с первого раза, используя только лопатки из одного комплекта. Существующая технология

обработки сопловых лопаток в сочетании с реальной точностью литья лопаток не позволяют выполнить данные требования без изготовления дополнительных лопаток или доработки выходной кромки сопловых лопаток. Для выполнения доработки соплового аппарата необходимо выполнить его возврат в механический цех. Там уже будет выполнена разборка собранного соплового аппарата, а затем выполнены все необходимые корректирующие действия с сопловым аппаратом. После этого необходимо вновь измерить общую площадь проходного сечения соплового аппарата и если она соответствует заданному значению, то сопловой аппарат возвращают в сборочный цех для продолжения сборки газотурбинного двигателя [7].

В сборочном цехе при входном ручном контроле выполняют проверку результатов измерения общей площади проходного сечения соплового аппарата, полученных в механическом цехе. Если измерения не соответствуют результатам контроля в сборочном цехе, сопловый аппарат возвращается на доработку в механический цех.

1.1 Проблемы производительности и точности изготовления сопловых лопаток и сборки соплового аппарата с обеспечением требуемой площади проходного сечения соплового аппарата

Повышение производительности и увеличение точности обработки ответственных деталей и узлов газотурбинного двигателя с обеспечением заданных параметров деталей является приоритетным направлением в газотурбинной отрасли. Поэтому моторостроительные предприятия вынуждены постоянно внедрять новые технологии и современные многоосевые станки с ЧПУ, повышать производительность изготовления деталей, уменьшать себестоимость и трудоёмкость операций, а также минимизировать или при возможности отказываться от ручного труда как очень трудоёмкого процесса [67, 68, 69].

Одной из таких деталей с длительным производственным циклом изготовления являются сопловые лопатки, которые изготавливаются из

жаропрочных сплавов на никелевой основе [65]. Сопловые лопатки работают в горячей части газотурбинного двигателя при температуре порядка 1300-1500°C. Процесс обработки жаропрочных сплавов сложен и трудоёмок. Наиболее эффективным методом обработки данных деталей является использование абразивного режущего инструмента и современного шлифовального оборудования с ЧПУ.

Изучение различных технологических процессов и методов обработки с применением абразивного инструмента показало неоспоримое преимущество глубинного шлифования при обработке жаропрочных сплавов. Применение глубинного шлифования на многоосевых станках с ЧПУ позволяет получать сложнопрофильные поверхности на различных деталях с высокой производительностью и точностью за счёт укрупнения количества переходов и обрабатываемых поверхностей в одной операции, уменьшения числа приспособлений, необходимых для обработки установочных поверхностей сопловой лопатки, совмещения в одной операции как черновой, так и чистовой обработки базовых поверхностей лопатки. Причём станок позволяет осуществлять поворот приспособления одновременно по нескольким осям.

Отечественными и зарубежными учёными были выполнены многочисленные исследования в области глубинного шлифования с применением высокопористых кругов, в результате чего, удалось достигнуть повышение производительности процесса от 2 до 6 раз по сравнению с лезвийной обработкой и традиционными методами шлифования.

Применение технологии глубинного шлифования с использованием высокопористых керамических шлифовальных кругов позволяет решить проблему точности, качества и шероховатости обработанных поверхностей. Кроме того, при обработке установочных поверхностей сопловых лопаток турбины появляется возможность скорректировать площадь проходного сечения соплового аппарата и решить проблему по обеспечению требуемой общей площади проходного сечения после сборки соплового аппарата с первого раза.

Данная проблема возникает из-за того, что каждая отливка имеет свои собственные отклонения пера от конструкторской модели сопловой лопатки. В результате чего возникает ситуация, что при изготовлении годных сопловых лопаток относительно базовых точек K1-K6, лопатки имеют отклонения по перу сверх допуска $\pm 0,3$ мм, заданного на литьё. Расположение перьев сопловых лопаток в пространстве формирует необходимую общую площадь проходного сечения соплового аппарата (рисунок 1.3).

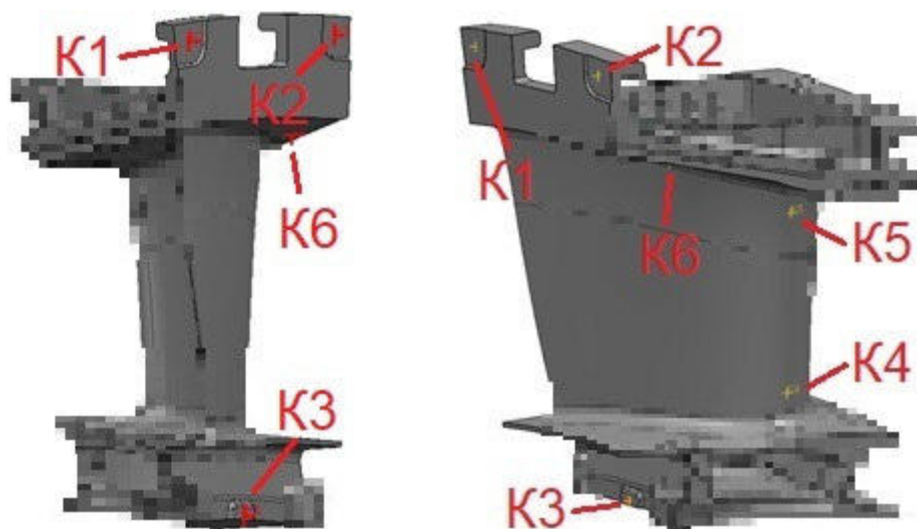


Рисунок 1.3 Сопловая лопатка 2-й ступени ТВД

На сегодняшний день существующие технологии обработки сопловых лопаток в России и мире не учитывают фактическую геометрию лопаток и фактическую величину площади проходного сечения соплового аппарата, в результате чего после обработки лопаток наблюдается отклонение фактической геометрии пера от заданной конструктором, а также после сборки этих лопаток в сопловой аппарат наблюдается разброс значений площадей межлопаточных окон между рядом стоящими лопатками по всему сопловому аппарату. Отклонение ППС СА от заданного значения приводит к изменению линии рабочих режимов газотурбинного двигателя.

В связи с этим задача разработки нового технологического процесса, обеспечивающего повышение производительности и точности изготовления сопловых лопаток, а также создание технологии обработки лопаток, которая

позволит обеспечить сборку сопловых аппаратов с требуемым значением площади проходного сечения соплового аппарата с первого раза, является весьма актуальной [65].

1.2 Анализ научных исследований технологии обработки сопловых лопаток и сборки сопловых аппаратов

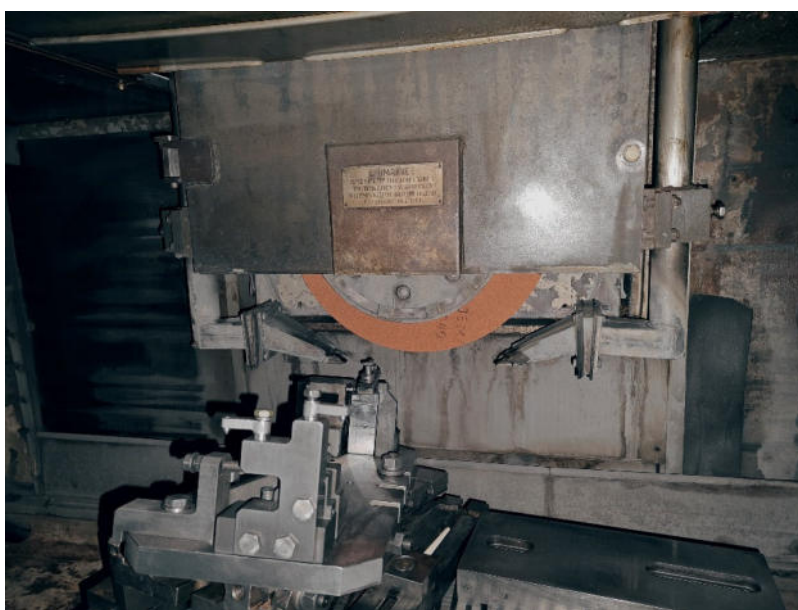
Одним из наиболее распространённых моделей станков, используемых для обработки плоских и радиусных поверхностей лопаток ТВД методом глубинного шлифования, является плоскошлифовальный станок ЛШ-220 производства Липецкого станкостроительного завода (рисунок 1.4, а). Это универсальный одношпиндельный станок с ЧПУ (рисунок 1.4, б), предназначенный для глубинного шлифования.

Данное оборудование для глубинного шлифования отличается предшественников наличием у него устройства для непрерывной правки шлифовального круга. Станок может обрабатывать криволинейные поверхности за счёт круговой интерполяции и одновременного перемещения рабочих органов шлифовального станка. Наличие функции непрерывной правки шлифовального круга позволило увеличить производительность и качество обработки поверхностей детали.

Для шлифования на станке ЛШ-220 чаще всего используются высокопористые шлифовальные круги из электрокорунда белого на керамической связке с порообразующим наполнителем [56] в виде фруктовых косточек, например, шлифовальные круги фирмы АО «Абразивный завод Ильич» (г. Санкт-Петербург). Для создания профиля на высокопористом шлифовальном круге применяются профильные алмазные ролики, которые позволяют создать требуемую геометрию круга для обработки профильных поверхностей лопатки, а также позволяют мгновенно восстанавливать режущую способность шлифовального круга.



а – общий вид станка ЛШ-220



б – рабочая зона станка

Рисунок 1.4 Плоскошлифовальный с ЧПУ для глубинного шлифования,
модель ЛШ-220

Обработка радиальных поверхностей канавок на сопловой лопатке чаще всего выполняется на модифицированных токарно-лобовых станках типа МК-163М (рисунок 1.5). Для выполнения радиальных операций у сопловой лопатки должны быть окончательно обработаны установочные плоскости и паз, благодаря данным поверхностям лопатка однозначно устанавливается в оснастку.

После обработки всего комплекта лопаток они все устанавливаются в специальную оснастку, которая имитирует рабочее положение сопловых лопаток в сопловом аппарате. Данное приспособление именуется стапель и устанавливается на шпиндель токарно-лобового станка. Установка и выверка данного приспособления весьма неудобна поскольку приспособление имеет габариты сопоставимые с сопловым аппаратом, имеет большую массу и требует больших временных затрат. Обработка радиальных поверхностей лопатки выполняется бакелитовыми или вулканизованными кругами, установленными на шлифовальной головке, которой оснащают модифицированные токарно-лобовые станки. Этими кругами чаще всего выполняют черновую прорезку залитых металлом канавок. Окончательная обработка канавок чаще всего выполняется с помощью канавочных резцов (рисунок 1.5) [16].



Рисунок 1.5 Модернизированный токарно-лобовый станок МК-163М
со шлифовальной головкой

На основании устанавливается и крепится шпиндельная бабка. Валы шпиндельной бабки смонтированы на подшипниках качения. Смазка механизмов бабки, централизованная [73].

Планшайба токарно-лобового станка служит для закрепления на ней специальной роторной оснастки (рисунок 1.6) вместе с обрабатываемыми

сопловыми лопатками. Станки данного типа модернизируют для обработки радиальных торцевых канавок на сопловых лопатках турбины. Для выполнения прорезки канавки отрезным кругом на суппорт устанавливают вместо резцедержателя специальную оснастку с закреплённой на ней шлифовальной головкой с приводом (рисунок 1.7). Электродвигатель за счёт ремённой передачи выполняет вращение вала, на котором установлен отрезной круг.



Рисунок 1.6 Роторное приспособление для установки лопаток [73]

Комплект сопловых лопаток, состоящий из 30-45 лопаток, собирается в специальную установочную оснастку, называемую стапель (рисунок 1.8). Базирование лопаток в стапеле осуществляется по тем же поверхностям, что и в реальном статоре турбины при сборке двигателя (рисунок 1.9). Профиль нижнего зацепа и радиальных торцевых канавок формируется за счёт врезного и продольного шлифования поверхностей лопаток. Для обработки зацепа применяется достаточно большая номенклатура шлифовальных кругов на бакелитовой и вулканитовой связке, а также отрезные круги [73].

Обработка выполняется в следующей технологической последовательности: сначала предварительно прорезается в сплошном металле канавка бакелитовым, вулканитовым или отрезным шлифовальным кругом без использования СОЖ. Режимы обработки устанавливаются исходя из опыта рабочего, осуществляющего обработку сопловых лопаток. Затем осуществляется чистовая обработка базового

радиуса и радиальных торцевых канавок токарными резцами, обработка выполняется также без охлаждения СОЖ.



Рисунок 1.7 Сменный привод для шлифовальных кругов, который устанавливается на суппорт токарно-лобового станка

При обработке нижней полки, зацепа и торцов сопловых лопаток в роторном приспособлении используют шлифовальные и отрезные круги диаметром от 125 до 250 мм [73].



Рисунок 1.8 Роторное приспособление для установки сопловых лопаток [73]

Обработка сопловых лопаток, установленных в стапеле на токарно-лобовом станке, имеет ряд существенных недостатков [73]:

- Процесс обработки достаточно трудоёмкий, а точность обработки зависит от квалификации рабочего и последующего контроля обработанных поверхностей лопатки на токарно-лобовом станке;

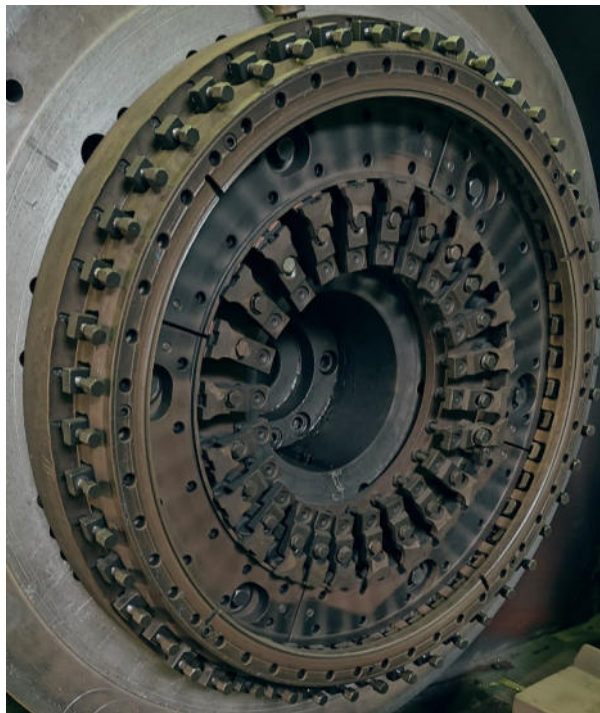


Рисунок 1.9 Общий вид роторного приспособления, установленного на токарно-лобовом станке необходимого для шлифования сопловых лопаток

- При обработке без смазочно-охлаждающей жидкости возможны ситуации, когда на поверхности лопатки могут образовываться шлифовочные дефекты, такие как прижоги и трещины;
- При обработке комплекта лопаток рабочий вынужден обрабатывать на низкопроизводительных режимах из-за отсутствия охлаждения на станке, что приводит к ухудшению качества обрабатываемых поверхностей и увеличению трудоёмкости обработки радиальных поверхностей сопловой лопатки.

Большая трудоёмкость и сложность обработки радиальных поверхностей сопловых лопаток вызвана тем, что рабочий вынужден вручную управлять модернизированным станком, поэтому для выполнения этой операции требуется

рабочий с высокой квалификацией [73]. При установке сопловых лопаток в специальный стапель от рабочего требуется аккуратная и точная установка каждой лопатки в приспособление, постоянный контроль за износом отрезных и шлифовальных кругов, применяемых на операции, необходима постоянная ручная правка абразивного инструмента непосредственно на токарно-лобовом станке, постоянный контроль размеров канавок и радиусов сопряжений после обработки, требуется постоянная поднастройка токарно-лобового станка для обеспечения заданных размеров. Точность изготовления стапеля также оказывает влияние на точность изготовления сопловых лопаток и образование ступенек, лесенок и перепадов между рядом стоящими лопатками после сборки этих лопаток в сопловой аппарат. Данные уступы негативно сказываются на аэродинамике соплового аппарата поскольку набегающий поток упирается в ступеньки в результате чего создаётся дополнительное сопротивление и возмущение потока с образованием отрыва потока от проточной поверхности сопловых лопаток. Установка лопаток в стапель связана с базированием каждой лопатки по установочным поверхностям лопатки, при этом каждая лопатка ориентируется (базируется) по разным элементам одного стапеля, из-за этого все лопатки устанавливаются в стапеле по-разному. Элементы стапеля, отвечающие за позиционирование лопатки выполнены каждый со своей точностью и погрешностью, что в свою очередь, оказывает влияние на точность изготовления лопаток и образование уступов между рядом стоящими лопатками. Кроме того, для обработки сопловых лопаток часто применяют стапеля, имеющие схожий посадочный диаметр, что позволяет механическому цеху, обходиться без изготовления нового стапеля с требуемым посадочным диаметром таким как в реальном сопловом аппарате. Цех вынужден так поступать для сокращения сроков подготовки производства и снижения финансовых затрат на изготовление нового дорогостоящего стапеля. В существующей серийной технологии изготовления лопаток невозможно обработать радиальные поверхности лопатки без изготовления стапеля. В результате после сборки таких лопаток в сопловой

аппарат появляются уступы между рядом стоящими лопатками. В дополнение к вышеперечисленным проблемам работа на данном оборудовании сопряжена с несоблюдением норм техники безопасности и охраны труда поскольку зона обработки открыта, а установленный кожух и система вытяжной вентиляции не даёт полной гарантии, что абразивная пыль не разлетится по всему цеху, где установлено данное оборудование. Абразивная пыль, шум, вибрации создают вредные условия труда для рабочего, что оказывает пагубное влияние на самочувствие и здоровье рабочего. Данные условия работы являются неблагоприятными, а также не отвечают санитарно-гигиеническим требованиям и условиям труда по сравнению с условиями работы на многоосевом шлифовальном станке с ЧПУ. Рабочему на токарно-лобовом станке приходится работать всю смену с высоким уровнем концентрации и в напряжённом состоянии [73].

Применяемые на радиальных операциях шлифовальные, бакелитовые шлифовальные и отрезные круги имеют ряд недостатков:

1. Твёрдые шлифовальные круги имеют тенденцию к засаливанию, а мягкие шлифовальные круги имеют склонность быстро осыпаться во время обработки, что приводит к изменению профиля круга и частым правкам круга;
2. При обработке детали на станке существует опасность разрыва шлифовального круга, что может привести к серьёзной травме рабочего.
3. Применение шлифовальных кругов, имеющих в составе крупные зерна, позволяет увеличить производительность, но при этом обработанные поверхности лопатки имеют более высокую шероховатость и риски;
4. При обработке лопаток в зоне резания образуется высокая температура, а бакелитовая связка имеет склонность размягчаться, что может привести к разрушению круга;
5. Применение шлифовальных кругов для обработки с открытой (7-8) или очень открытой структурой (9-10), а не высокопористой структурой (от 13 и

выше) зачастую приводят к быстрому засаливанию шлифовального круга при обработке деталей.

1.3 Особенности глубинного шлифования установочных поверхностей лопатки на станках с ЧПУ

Универсальные шлифовальные станки и шлифовальные станки с ЧПУ используются для механической обработки деталей в среднем около 25 % от общего объёма механической обработки, при этом порядка 70 % обработки высокоточных деталей выполняется на шлифовальном оборудовании [31, 32]. Среди всего шлифовального оборудования общим для них является обработка заготовок абразивными инструментами или шлифовальными кругами [31, 32].

Применение шлифовального оборудования в общем случае позволяет достигать 4...7 качества точности и обеспечивать шероховатость поверхности $Ra = 0,32...1,25$ мкм. Более точное шлифование позволяет достичь шероховатости $Ra = 0,08...0,38$ мкм, а для наиболее ответственных деталей с помощью шлифования возможно достичь шероховатости $Ra = 0,02... 0,08$ мкм. Одним из высокопроизводительных методов является процесс глубинного шлифования [73]. Глубинное шлифование (Creep Feed Grinding) деталей обычно выполняется на режимах резания: скорость вращения шлифовального круга задаётся от 20 до 60 м/с, подача шлифовального круга от 50 до 500 м/мин, а величина съёма металла (глубина резания) от 0,1 до 30 мм. При этом удельный съём металла, составляет от 0,1...10 мм³/мм·с.

Особенностью глубинного шлифования является увеличенная длина пути абразивного зерна, которое зерно проходит при вхождении в контакт с деталью. Также характерной особенностью является большое число абразивных частиц, которые одновременно находятся в контакте при обработке детали. При этом каждое абразивное зерно срезает более тонкую и длинную стружку по сравнению с обычным шлифованием [9]. Из-за большого числа абразивных зёрен, одновременно находящихся в контакте с деталью во время обработки в зоне

резания, выделяется много тепла, что требует хорошего охлаждения детали большим объёмом смазочно-охлаждающей жидкостью [9].

В последнее время производители шлифовального оборудования представили на мировом рынке новые многоосевые шлифовальные станки с ЧПУ. Ключевой особенностью данных станков является их компоновка (рисунок 1.10), а именно наличие наклонно-поворотного стола (рисунок 1.11), устройства непрерывной правки и балансировки шлифовальных кругов, управляемой форсунки подачи высоконапорной СОЖ, что позволило значительно расширить возможности применения шлифовального оборудования для обработки сложных деталей, таких как детали турбины газотурбинного двигателя. За счёт наклонно-поворотного стола стало возможным использовать меньшее число приспособлений, укрупнить число переходов на одной установке, а также повысить точность и производительность обработки за счёт снижения числа переустановки и больших величин съёма и режимов резания.

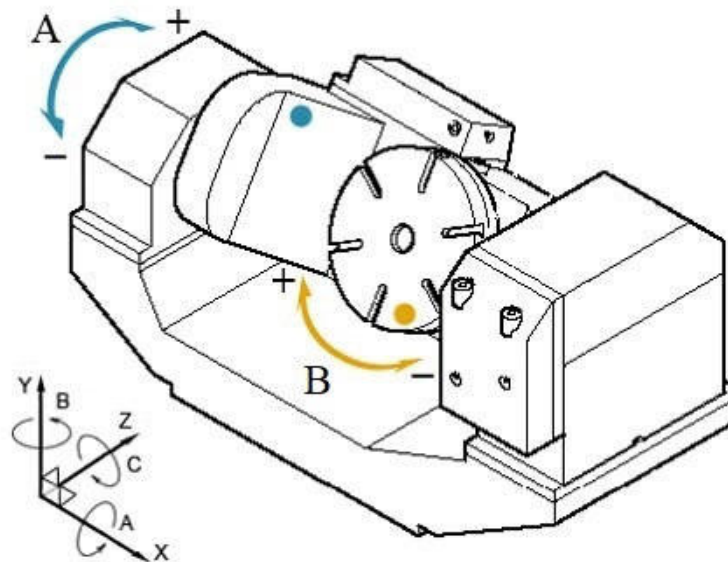


Рисунок 1.10 Кинематическая схема наклонно-поворотного стола
для многоосевого станка с ЧПУ



Рисунок 1.11 Внешний вид наклонно-поворотного стола
многоосевого станка с ЧПУ

Повышение режимов резания обеспечивается за счёт применения высокопористых шлифовальных кругов, непрерывной правки, оптимальной подачи СОЖ под большим давлением и объёмом СОЖ в зону резания.

1.3.1 Шлифовальные станки с ЧПУ, используемые при глубинном шлифовании

С учетом требований, предъявляемых к обрабатываемым деталям, были выбраны и проанализированы основные производители шлифовальных станков с ЧПУ, используемые при глубинном шлифовании, среди них:

- 5-ти осевой профилешлифовальный станок с ЧПУ модели PROFIMAT MC 610 фирмы «Blohm», система управления ЧПУ Siemens Sinumerik 840D, страна-изготовитель Германия (рисунок 1.12) [68, 69, 70]. Данный станок предназначен для комплексной обработки сложных деталей, компоновка станка позволяет работать одновременно по пяти осям. Станок позволяет выполнять сверлильные и фрезерные операции. Современная конструкция станка и концепция системы управления обеспечивают высокую производительность и точность обработки в условиях единичного, мелко и среднесерийного производства [68].



Рисунок 1.12 Станок PROFIMAT MC 610 с системой смены инструмента

- 5-ти осевой профилешлифовальный станок с ЧПУ, модель FGC 2 фирмы «Bridgeport», и система управления Heidenhain, страна-изготовитель Англия (рисунок 1.13). Компоновка станка представляет вертикальное расположение шпинделя с поворотной головкой и наклонно-поворотный стол. Станок предназначен для комплексной обработки шлифованием сложных деталей с круговой интерполяцией одновременно по пяти осям координат [68]. На станке также можно выполнять сверильную и фрезерную обработку с пяти сторон и под любым углом.



Рисунок 1.13 Станок Bridgeport FGC 2

- 5-ти осевой профилешлифовальный станок с ЧПУ модель Multigrind CB фирмы «Haas», системой управления Siemens Sinumerik 840D, страна-производитель Германия (рисунок 1.14) [68]. Компоновка станка выполнена с вертикальным расположением шпинделя с поворотной головкой и поворотный

стол. Станок предназначен для комплексной обработки шлифованием сложных деталей с круговой интерполяцией одновременно по пяти осям координат [68]. На станке также можно выполнять сверлильную и фрезерную обработку с четырёх сторон и под любым углом [68].



Рисунок 1.14 Станок Multigrind CB

- 5-ти осевой профишлифовальный станок с ЧПУ модель MFP-050.65.65 фирмы «Magerle», система управления Sinumerik 840D, страна-производитель Швейцария (рисунок 1.15) [68, 69, 70]. Компоновка станка выполнена с горизонтальным расположением шпинделя и поворотный стол. Станок предназначен для комплексной обработки шлифованием сложных деталей с круговой интерполяцией одновременно по пяти осям координат. На станке также можно выполнять расточку, сверлильную и фрезерную обработку с пяти сторон и под любым углом. Современная конструкция станка и концепция системы управления обеспечивают высокую производительность и точность обработки в условиях единичного, мелко и среднесерийного производства [65, 68].



Рисунок 1.15 Станок фирмы «Mägerle» модель MFP-050.65.65

- 5-ти осевой профилишлифовальный станок с ЧПУ модели ELB Micro Cut 4 фирмы «ELB-Schleiff», система управления Siemens Sinumerik 840D, страна производитель Германия (рисунок 1.16). Данная модель станка предназначена обработки как плоских, так и фасонных поверхностей лопатки и других деталей из труднообрабатываемых материалов. Модель Micro-Cut 4 – это компактная модель станка с ЧПУ системой управлением и подвижной стойкой. В станке реализован принцип стационарного рабочего стола, а перемещение всех осей станка происходит за счёт инструмента, благодаря этим принципам обеспечивается максимальная производительность шлифования. Такая компоновка станка позволяет занимать минимальное место для установки станка и при этом без потери производительности [68].



Рисунок 1.16 Micro Cut 4 250-S840D фирмы «ELB-Schleiff»

Ниже представлены краткие технические характеристики станков ведущих станкостроительных фирм в таблице 1.1.

Таблица 1.1 Краткие технические характеристики станков

Название фирмы	BLOHM	Bridgeport	Haas	Mägerle	ELB-Schleiff	СТАНКО-ВЕНДТ
Страна изготовитель	Германия	Англия	Германия	Швейцария	Германия	Россия
Модель станка	PROFIMAT MC 610	FGC2	Multigrind CB	MFP-050.65.65	Micro Cut 4 250	SXS (СТШ) 611 CNC
Габариты (Д×Ш×В), мм	2380×3950×2900	2700×4034×3430	3000×2650×3550	5377×3635×3458	7730×4180×2890	5750×4150×3100
Масса, кг	7800	1400	9000	9000	9000	9000
Общая потребляемая мощность, кВт	100	90	-	82	47	115
Напряжение в сети	400±10%	400±10%	400±10%	400±10%	400±10%	400±10%
Максималь. размеры обрабатываемой детали	450×450×200 отдельно до 500 мм	150×150×100 отдельно до 300 мм	450×450×200 отдельно до 500 мм	350×350×350 отдельно до 500 мм	150×150×100 отдельно до 300 мм	350×350×200 отдельно до 300 мм
Расположение шпинделя	Горизонт.	Вертикаль.	Вертикаль.	Горизонт.	Горизонт.	Горизонт.
Мощность шпинделя, кВт	45	38	30	50	28	28
Максималь. обороты шпинделя, об/мин	8000	8000	8000	10000	6500	5000
Максималь. диаметр шлифоваль. круга, мм	500	250	300	300	500	500

Продолжение таблицы 1.1

Максималь. высота круга, мм	50	50	50	60	100	100
Максималь. скорость шлиф. круга, м/с	до 45	до 45	до 45	до 63	до 45	до 35
Точность перемещения по осям, мм	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Вращение стола станка	360°	360°	360°	360°	360°	360°
Наличие паллет	есть, если потребуется	есть, если потребуется	есть, если потребуется	есть, если потребуется	нет	нет
Нагрузка на наклонно- поворотный стол	250 кг	250 кг	-	250 кг	-	-
Возможность фрезерования и сверления	есть	есть	есть	есть	нет	нет
Емкость инструмента льного магазина	10	48	7	24	нет	20
Устройство вытяжки масленного тумана	есть	есть	есть	есть	есть	есть

На основании анализа преимуществ и недостатков оборудования выполнена сравнительная экспертная оценка основных данных в таблице 1.2.

Таблица 1.2 Экспертная оценка предлагаемого оборудования

№ п/п	Фирма, Модель, Страна	Технологиче- ские возможности комплексной обработки лопаток турбины, наличие ПО	Возможность обработки радиальных канавок различной конфигурации на сопловых лопатках ТВД	Функцио- нальная комплек- тация станка	Опыт работы фирмы в области обработки лопаток и деталей турбины	Общ ий балл
1.	«Mägerle», MFP- 050.65.65, Швейцария	5	5	5	5	20
2.	«Blohm», PROFIMAT MC 610, Германия	3	3	4	5	15
3.	«ELB- Schleiff», Micro Cut 4 250, Германия.	4	3	3	4	14
4.	«Bridgeport», FGC 2, Англия	3	3	4	3	13
5.	«Hass», Multigrind CB, Германия	3	2	4	3	12
6.	«СТАНКО- БЕНДТ», SXS (СТШ) 611 CNC, Россия	3	2	3	2	10

Согласно функциональным возможностям наилучшим станком для решения задач обработки сложнопрофильных деталей ГТД является многоосевой профилешлифовальный станок модели MFP-050.65.65 фирмы «Mägerle».

1.3.2 Режущий инструмент, используемый при глубинном шлифовании

В результате многолетних теоретических и экспериментальных исследований термодинамических процессов, протекающих при использовании метода глубинного шлифования на станках с ЧПУ, установлено [65], что

обязательное применение высокопористых и высокоструктурных шлифовальных кругов должны обеспечивать ряд следующих требований для автоматизированной обработки сопловых лопаток турбины:

1. Режущая поверхность шлифовального круга должна обеспечивать в процессе обработки транспортировку охлаждающих жидкостей в зону обработки и удаление шлама за счёт повышенной пористости;

2. Шлифовальные круги должны иметь высокую динамическую прочность и высокую прочность связки за счёт специальной рецептуры, обеспечивающей оптимальную твердость для сохранения профиля поверхности круга;

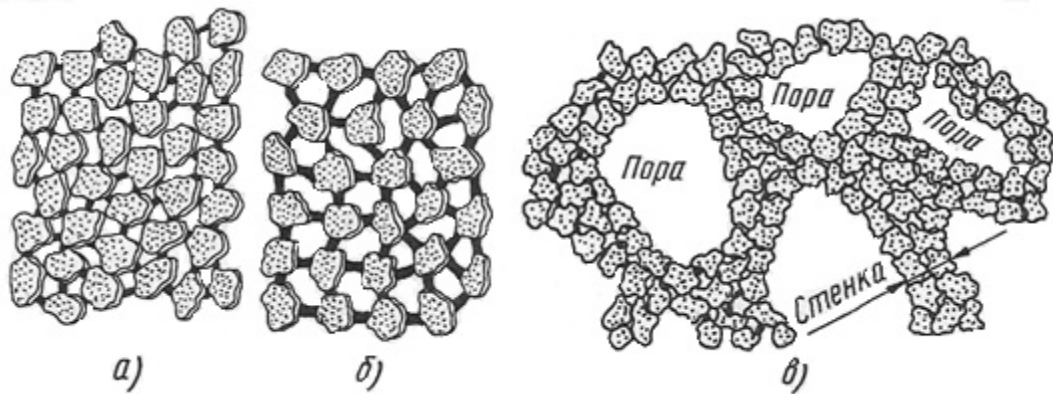
3. Качество поверхностного слоя сопловых лопаток турбины (шероховатость, величина и характер остаточных напряжений, величина и степень наклепа) должны соответствовать требованиям конструкторской документации;

4. Шлифовальные круги не должны быть изготовлены из токсичных материалов, иметь оптимальные по форме и составу выгорающие и невыгорающие порообразователи.

Высокопористые шлифовальные круги – это круги с повышенной структурностью и повышенной пористостью в 45-60% от объёма шлифовального круга. Высокопористые шлифовальные круги изготавливают с объёмным содержанием абразивного зерна менее 40% и с пористостью более 45%. Высокопористые шлифовальные круги на керамических связках получили широкое распространение в черновых операциях [31, 32], при этом выполняются съёмы материала порядка 0,5 ...1 мм за один проход. Также высокопористые круги применяются для операций предварительного и окончательного шлифования поверхностей деталей, выполненных из различных материалов и сплавов. Данные шлифовальные круги хорошо себя показали при обработке различных материалов таких как закаленные, незакаленные и углеродистые стали, инструментальные и нержавеющие стали, труднообрабатываемые и жаропрочные

сплавы с высоким содержанием никеля, при обработке титановых сплавов и др. Высокопористые шлифовальные круги показали себя очень эффективными при обработке вязких сталей и сплавов, жаропрочных сплавов и прочих вязких материалов [31, 32]. Данные круги позволяют обеспечивать обработку поверхностей деталей без образования прижогов, при этом обеспечивая требуемую шероховатость и точность обработанных поверхностей детали. Использование высокопористых шлифовальных кругов при шлифовании труднообрабатываемых деталей таких как рабочие и сопловые лопатки позволяет повысить производительность процесса шлифовки деталей в 2...5 раз по сравнению с традиционными методами шлифования. После обработки данными кругами поверхности деталей обеспечивают требуемые показатели качества и при этом отсутствуют дефекты такие как прижоги и трещины [10].

На рисунке 1.17 показаны возможные модели объёмного строения различных структур, в том числе высокопористых (рисунок 1.17в), высокоструктурного абразивного инструмента, в котором содержится порообразователь в виде микросфер [56].



а – закрытая, б – открытая, в – высокопористая

Рисунок 1.17 Модели различных структур шлифовальных кругов [56]

Большое распространение получили высокопористые круги с повышенными номерами структуры от 12 до 18 (среднее содержание зерна в шлифовальном круге составляет 26...30% объёма) и при этом пористость круга может достигать до 80% объёма шлифовального круга [56]. Эффективнее всего

использовать высокопористые шлифовальные круги на операциях шлифования сложнопрофильных поверхностей деталей турбины, таких как рабочие и сопловые лопатки, секторов, блоков паянных, обтекателей и обечаек, надроторных вставок и других деталей турбин. Данные детали преимущественно используются в газотурбинных двигателях, газотурбинной и энергетической отрасли. Лопатки рассчитаны для работы в условиях высоких температур и агрессивных сред. Для изготовления лопаток турбины применяют жаропрочные, жаростойкие сплавы и стали, что затрудняет их механическую обработку и увеличивает трудоёмкость изготовления лопаток.

На рисунке 1.18 представлены различные конструкции рабочих лопаток разных размеров и разнообразного конструктивного исполнения. На данных лопатках выполнена обработка елочного замка, торцов и сложнопрофильных поверхностей лопатки. Лопатки турбины чаще всего изготовлены из жаропрочных сплавов с большим содержанием никеля в составе. Обработка елочного замка лопатки выполняется методом профильного глубинного шлифования на шлифовальном станке с ЧПУ. Обработка профиля елочного замка и торца выполняется за 3...8 проходов. Самым ответственным переходом при обработке рабочей лопатке является обработка профиля елочного замка, к которому предъявляют высокие требования к точности и качеству обработанных поверхностей замка [14].



Рисунок 1.18 Общий вид конструкции рабочих лопаток турбины [14]

В процессе глубинного шлифования шлифовальный круг имеет большую площадь контакта с заготовкой, а для части таких поверхностей процесс охлаждения и подачи СОЖ в зону резания может быть затруднен. Во время глубинного шлифования на шпиндель станка действует большая нагрузка, а в зоне резания образуется большое тепловыделение, что может привести к образованию трещин на обработанной поверхности детали [18].

Для глубинного шлифования используются высокопористые шлифовальные круги на основе электрокорунда с использованием керамической связки. Изготавливают шлифовальные круги диаметром от 300 до 500 мм прямого или специального профиля, у которых высота круга составляет от 10 до 100 мм [31, 32].

Лидирующие позиции в области производства высокопористых шлифовальных кругов со структурами 16...22, используемых для профильного глубинного шлифования турбинных лопаток, занимает австрийская фирма «Tyrolit» [31, 32]. Среди отечественных производителей известен «Абразивный завод «Ильич» (г. Санкт-Петербург), который выпускает инструмент с номерами структуры 10...12 на основе применения выгорающего наполнителя – молотых фруктовых косточек.

В НИЦ «Новые технологии и инструменты» МГТУ «Станкин» (г. Москва) и под научным руководством профессора, доктора технических наук В.К. Старкова созданы новые высокопористые абразивные шлифовальные круги на керамических связках с номерами структуры больше 10-12 [134]. Новая технология изготовления основана на применении в качестве порообразователей полые микросферы различного состава [134], а также варианты кругов, в которых в качестве порообразователей используются как выгорающий наполнитель, так и полые микросферы. За счёт большой вариативности становится возможным получать высокопористые шлифовальные круги в широком диапазоне характеристик, что позволяет получать требуемые эксплуатационные свойства и высокую производительность абразивного инструмента.

Новая технология изготовления высокопористых шлифовальных кругов с повышенной структурностью внедрена на предприятии ООО «Волгашлиф Плюс» (г. Рыбинск, Ярославская обл.). Высокопористые шлифовальные круги получили распространение при производстве газотурбинных двигателей, газоперекачивающих установок, моторов для автомобилей, редукторов, подшипников, станков, различного инструмента и др. [31, 32]

Испытания высокопористых шлифовальных кругов были проведены при обработке сложнопрофильных поверхностей турбинных лопаток, изготовленных из жаропрочных сплавов на никелевой основе. Обработка турбинных лопаток выполнялась методом глубинного шлифования [22].

Сложность обработки жаропрочных сплавов требует от высокопористых шлифовальных кругов определенного содержания абразивного зерна, зернистости, твердости, номера структуры и пористости. Для жаропрочных материалов разработаны и внедрены специальные составы абразивных масс, которые изготовлены на предприятии ООО «Волгашлиф Плюс». Создана линейка новых высокопористых шлифовальных кругов прямого профиля типоразмеров 300x76,2x50, 300x76,2x30, 300x76,2x20, 300x76,2x15 из электрокорунда белого зернистостью F80, твердостью F и G со структурами номер 14 и 16 [68, 69].

В ходе производственных испытаний на предприятии АО «ОДК-Авиадвигатель» проверена режущая способность новых высокопористых шлифовальных кругов фирмы «Волгашлиф Плюс» по сравнению с зарубежными шлифовальными кругами фирмы «Tyrolit».

В качестве образцов были взяты забракованные по толщине стенок сопловые лопатки турбины из сплава марки ЖС6У-ВИ, на которых обработали установочные поверхности, оба радиальных клина, а также торцы со стороны входной и выходной кромки сопловой лопатки.

По результатам испытаний, выполненных в условиях предприятия АО «ОДК-Авиадвигатель», установлено, что новые высокопористые шлифовальные

круги фирмы ООО «Волгашлиф Плюс» показали высокую режущую способность, обеспечили требуемую шероховатость и точность. ЛЮМ-контроль подтвердил отсутствие трещин и прижогов на обработанных поверхностях лопатки. А также данные высокопористые круги обеспечили производительность обработки, не уступающей кругам фирмы «Tyrolit» при обработке сопловой лопатки с применением различных схем шлифования. В ходе испытаний новых шлифовальных кругов на оборудовании АО «ОДК-Авиадвигатель» не было зафиксировано значительной разницы в нагрузке на шпинделе станка с ЧПУ. В ходе шлифования поверхностей лопатки высокопористыми кругами и постоянной непрерывной правкой существенных ухудшений процесса резания и изменений в процессе шлифования не зафиксировано [56].

Все детали, обработанные новыми шлифовальными кругами, прошли обязательный ЛЮМ-контроль и внешний осмотр обработанных поверхностей на отсутствие видовых и шлифовальных дефектов. По результатам проведенного контроля все детали признаны годными.

В результате проведенных производственных испытаний при профильном глубинном шлифовании хвостовиков турбинных лопаток из сплавов марок ЖС6У-ВИ, ЖС26-ВИ, ЖС32-ВИ установлено, что новый отечественный абразивный инструмент по своей работоспособности существенно превосходит зарубежный и отечественные высокопористые круги со структурой 12: производительность по скорости съема материала до 2,7 выше; по машинному времени обеспечено снижение до 1,6 раз [31, 32].

В сравнении с лучшими зарубежными аналогами на одинаковых режимах глубинного шлифования хвостовиков турбинных лопаток испытанные высокопористые круги обеспечили до 150% меньшую динамическую напряженность процесса. Это позволило повысить производительность процесса обработки без ущерба для точности и качества обработки новым абразивным инструментом до 40%. При этом затраты на абразив снижаются до 2,5 раз по

сравнению с известными отечественными аналогами и более чем в 5 раз относительно шлифования кругами зарубежных фирм [31, 32, 134].

1.3.3 Понятие о процессе глубинного шлифования лопаток турбин

Технологический процесс производства лопаток турбин должен обеспечивать высокую производительность, должен быть экологически безопасным процессом, экономически эффективным для ответственных деталей газотурбинных двигателей [27, 50].

Новые принципы производства лопаток турбин основаны на:

1. Оригинальных технологических схемах профильного глубинного шлифования с непрерывной правкой шлифовальных кругов, совмещением большого количества переходов на одной операции и минимизация числа установок необходимых для обработки лопатки до 3...4 шт., назначение оптимальных режимов шлифования и правки, обеспечивающих значительное снижение трудоемкости, а также обеспечивающих высокое качество изготовления деталей при минимальных затратах на обработку;

2. Использовании особенностей новых моделей отечественных станков, которые благодаря своей конструкции, техническому оснащению и программному обеспечению превосходят по ряду параметров зарубежные аналоги, имея значительно меньшую стоимость;

3. Применении новых отечественных шлифовальных кругов с повышенной структурой (номерами структуры 14...22) и пористостью, которые позволяют уменьшить температуру при использовании метода глубинного шлифования, снизить расход кругов, обеспечивая сокращение затрат на инструмент.

В результате анализа литературы получены сведения о современных методах абразивной обработки деталей машин из различных труднообрабатываемых, жаропрочных сталей и сплавов, которые обеспечивают высокую производительность, требуемое качество поверхности деталей, а также способствует снижению себестоимости обработки [73].

Проанализированы современные сведения о различных процессах абразивной обработки. Рассмотрены виды и характеристики абразивных инструментов. Приведены основные принципы выбора характеристик абразивных инструментов и режимов абразивной обработки. Приведены данные о классах точности и неуравновешенности шлифовальных кругов, проверки их прочности и их маркировке.

Рассмотрены рецептурные составы, технология изготовления и их влияние на эксплуатационные свойства высокопористого абразивного инструмента, достижения в создании и применении высокопористых кругов на основе эльбора, алмаза, монокристаллического корунда и традиционных абразивных материалов. Получены рекомендации по назначению характеристик кругов и режимов маятникового и глубинного шлифования. Учтены способы предотвращения шлифовочных прижогов и трещин, а также результаты исследований и примеры практической реализации шлифования зубчатых колес, фасонного инструмента, замков лопаток, обработки со скоростями до 100 м/с, в том числе без охлаждения и др. [131]

Проведен анализ методики системного анализа качества обработки поверхностей при глубинном профильном шлифовании на многокоординатном станке профилей сложной формы и алгоритм действий по обеспечению качества глубинного профильного шлифования лопаток, математическая модель теплодинамической системы шлифовального станка в виде структурной схемы при учете процесса резания.

1.4 Анализ методов контроля проходного сечения соплового аппарата

На текущий момент контроль общей площади проходного сечения соплового аппарата газотурбинного двигателя осуществляется на различных двигателестроительных предприятиях различными методами. Контроль площади проходного сечения соплового аппарата осуществляется после сборки обработанных сопловых лопаток в сопловой аппарат. Чаще всего контроль общей

площади проходного сечения соплового аппарата осуществляют вручную с применением шаблонов или специальных приборов, с помощью которых выполняют замер размеров в определенных сечениях межлопаточного канала в сопловом аппарате. Результаты измерений, полученные вручную, сильно зависят от квалификации контролёра, точности контрольных приборов и корректности их настройки. В результате измерения, полученные в механическом и сборочном цехе, могут существенно отличаться, что приводит к неоднократному возврату собранного соплового аппарата из сборочного цеха обратно в механический цех.

Для контроля сопловых лопаток и собранного соплового аппарата применяются: измерительные инструменты (штангенциркуль, микрометр и т.д.), специальные индикаторы, калибр-скобы и пробки, шаблоны и другие инструменты, позволяющие выполнить контроль размеров вручную.

Для автоматизации процесса контроля площади проходного сечения соплового аппарата могут быть использованы:

- Контактные измерительные системы такие как координатно-измерительные машины, измерительная рука и др.
- Бесконтактные системы, такие как лазерные и оптические системы.
- Специальные приборы для измерения определенных параметров или узко специализированных задач;
- Специализированные установки для контроля расхода, например, прокачка воды через собранный сопловой аппарат;

Фирмой АО «НИИИзмерения» разработан специальный прибор модели БВ-7631 (рисунок 1.19) для геометрического контроля площади проходного сечения соплового аппарата. Данная микропроцессорная измерительная система предназначена для геометрического контроля площадей проходного сечения сопловых аппаратов I-IV ступеней двигателя ТВ3-117 и его модификаций [113].

Таблица 1.3 Технические характеристики микропроцессорной измерительной системы БВ-7631 [113]

Принцип действия	электронно-механический, контактный
Метод контроля	относительный (сравнение с образцовым проходным сечением)
Максимальное количество контролируемых окон одного соплового аппарата, не менее	100
Предел допускаемой погрешности контроля площади проходного сечения, мм ²	± 1
Количество типоразмеров окон, контролируемых с помощью одного электронного блока	до 4
Габаритные размеры контролируемых окон, мм: устройства для контроля проходного сечения электронного блока адаптера	по требованиям заказчика 235x100x120 70x100x80
Масса, кг: устройства для контроля проходного сечения электронного блока адаптера	0,6÷1,2 1,0 0,3

Технические характеристики измерительного прибора БВ-7631 могут быть изменены и адаптированы к производственным условиям Заказчика [113].

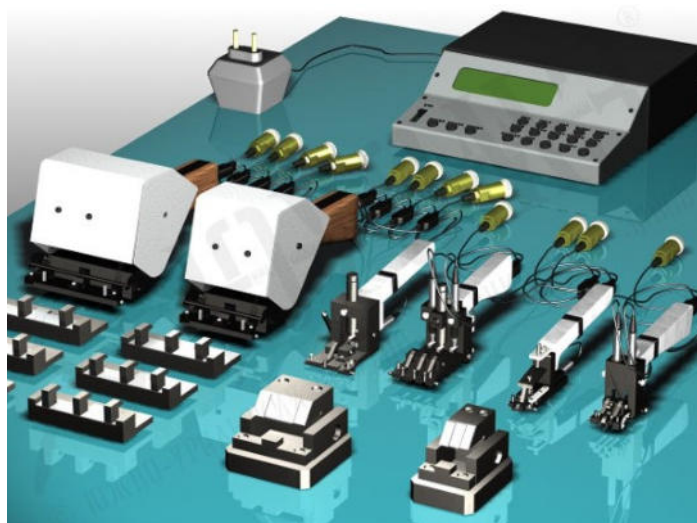


Рисунок 1.19 Прибор БВ-7631 [113]

Другим методом контроля площади проходного сечения соплового аппарата является метод определения расхода. В этом методе определение общей площади проходного сечения соплового аппарата выполняется после его сборки и осуществляется посредством водного пролива соплового аппарата в результате чего становится известна фактическая площадь. Однако, этот метод довольно трудоёмкий и дорогостоящий, так как он требует специального стенда и оснастки для проверки общей площади проходного сечения соплового аппарата.

Для измерения площади проходного сечения соплового аппарата, необходим специальный испытательный стенд (рисунок 1.20) и оборудование, которое позволит посредством прокачки жидкости определить фактический расход жидкости через сечение соплового аппарата. Зная расход, можно рассчитать общую площадь проходного сечения соплового аппарата.

Преимуществом этого метода является высокая точность и достоверность результатов измерения общей площади проходного сечения соплового аппарата.

Минусом использования данного метода является высокая стоимость выполнения работ и сложность проведения проверки. Для проверки соплового аппарата с другими размерами и новой геометрией требуется изготовить специальную установочную оснастку для проведения испытаний.



Рисунок 1.20 Испытательный стенд для определения пропускной способности сопловых аппаратов вертолетного двигателя типа ВК-2500 [116]

С помощью данного метода можно проверить только собранный сопловой аппарат, но нет возможности выполнить контроль площади одного межлопаточного канала для пары лопаток в сопловом аппарате.

Для автоматизации процесса измерений площади проходного сечения соплового аппарата и улучшения сходимости результатов измерения общей площади соплового аппарата можно использовать координатно-измерительную машину, точность измеренных размеров и повторяемость измерений вполне позволяет обеспечить необходимую точность измерения.

Преимуществом координатно-измерительных машин (КИМ) является то, что контактные способы измерения имеют большую точность измерения по сравнению с оптическими методами контроля, а, следовательно, измеренные размеры имеют большую точность и повторяемость по сравнению с размерами, полученными с помощью измерительной системы ATOS.

Но применение координатно-измерительной машины для измерения общей площади проходного сечения соплового аппарата требует наличия определенной комплектации КИМ, поскольку особенности, и специфика измерения площади соплового аппарата не позволяет использовать любую КИМ для выполнения данных измерений. Необходима определенной комплектации координатно-измерительная машина, которая обладает достаточно большой рабочей зоной, поворотный стол и обладать возможностью выполнять сканирующие измерения поверхности (рисунок 1.21). Ориентировочные размеры рабочей зоны КИМ по осям X и Y должны быть не менее 1000 мм, что позволит полностью разместить и измерить за один раз все межлопаточные каналы в собранном сопловом аппарате. Интегрированный поворотный стол, установленный в гранитной плите координатно-измерительной машины, что позволяет удобно измерять цилиндрические детали, а также последовательно измерять однотипные элементы детали, расположенные по кругу или на образующей поверхности детали, например, такие детали как корпус, сопловой аппарат и другие детали. Также координатно-измерительная машина должна иметь функционал непрерывного

измерения (сканирования) поверхностей детали, наличие этой функции зависит от установленной в пиноле координатно-измерительной машины измерительной головы. А, следовательно, в комплектации координатно-измерительной машины должен быть сканирующий измерительный модуль и комплект различных измерительных щупов как по диаметру, так и по длине. Данное оснащение координатно-измерительной машины позволяет быстро и с оптимальных углов выполнить измерение межлопаточных каналов соплового аппарата. Но даже такая комплектация координатно-измерительной машины потребует большого опыта и знаний от инженера по измерениям, чтобы написать измерительные программы для выполнения измерения единичных межлопаточных каналов в автоматическом режиме. К тому же измеряемый контур межлопаточного канала имеет сложную форму, поэтому во время измерения межлопаточного канала потребуется несколько раз дискретно изменить углы ориентации сборки щупов, чтобы обеспечить доступ ко всем поверхностям измеряемого канала.

На рынке появились новые координатно-измерительные машины, оснащённые измерительным модулем Renishaw Revo, который позволяет выполнять непрерывные измерения детали, изменяя углы щупа непосредственно во время измерения. Однако процесс программирования перемещения измерительного модуля и щупа в программном обеспечении весьма трудоёмкий и требует обязательной проверки разработанной измерительной программы до начала измерения на координатно-измерительной машине (рисунок 1.22). Данная координатно-измерительная машина, оснащённая непрерывным измерительным модулем Renishaw Revo и поворотным столом, обладает всеми необходимыми функциями для измерения единичных межлопаточных каналов в сопловом аппарате. Но измеренное фактическое сечение потребуется преобразовать в площадь проходного сечения межлопаточного окна поскольку данного функционала в стандартном программном обеспечении нет. К тому же потребуется автоматизировать весь процесс измерения каждого межлопаточного

канала в сопловом аппарате с выводом результата измерения фактической площади проходного сечения соплового аппарата [91].

Но решение этих проблем позволит автоматизировать процесс контроля общей площади проходного сечения соплового аппарата, но не решит проблемы по обеспечению или прогнозированию общей площади проходного сечения соплового аппарата.

Все координатно-измерительные машины, оснащенные стандартным и сканирующим модулем Renishaw Revo, имеют ряд особенностей связанных с измерением малых радиусов и переходных радиусов, а также необходимость подбора оптимальных углов для измерения контура проходного сечения между двумя лопатками, поверхностей или точек. Специфика контроля размеров и поверхностей на координатно-измерительной машине может существенно затруднить измерение сечения единичного межлопаточного канала. Это связано с тем, что доступ щупа к каналу может быть существенно ограничен во время измерения. Поскольку контур сечения имеет сложную геометрическую форму, что делает невозможным его измерение щупом с одного угла разворота сканирующего датчика, установленного на измерительной голове координатно-измерительной машины (рис 1.23 и 1.24).



Рисунок 1.21 Координатно-измерительная машина с поворотным столом

Zeiss Prismo ultra [117]

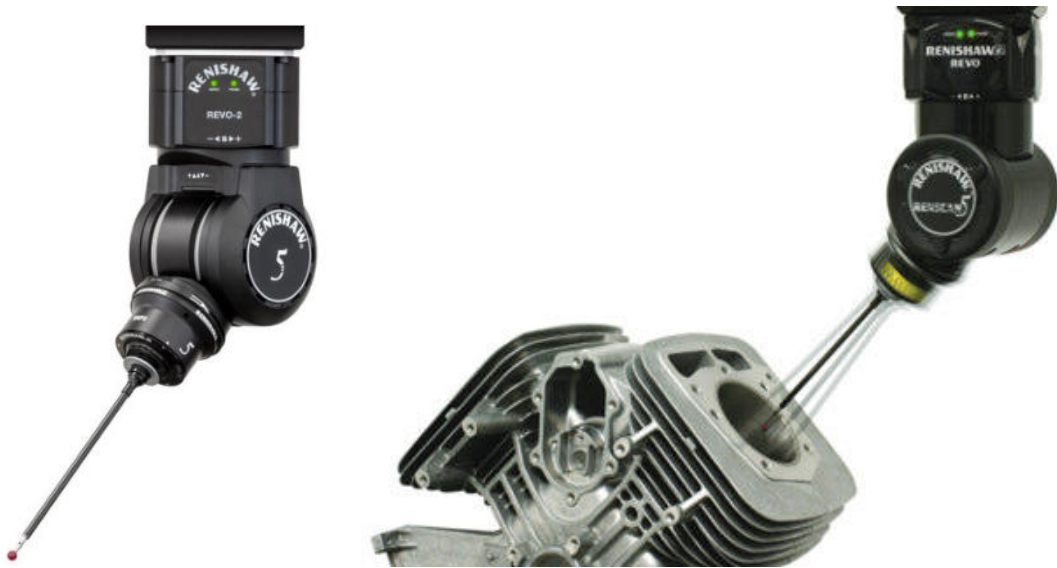


Рисунок 1.22 Контактная сканирующая измерительная система Renishaw REVO [158]



Рисунок 1.23 Измерение поверхностей блока лопаток 1 ступени ТВД на координатно-измерительной машине, вид сверху

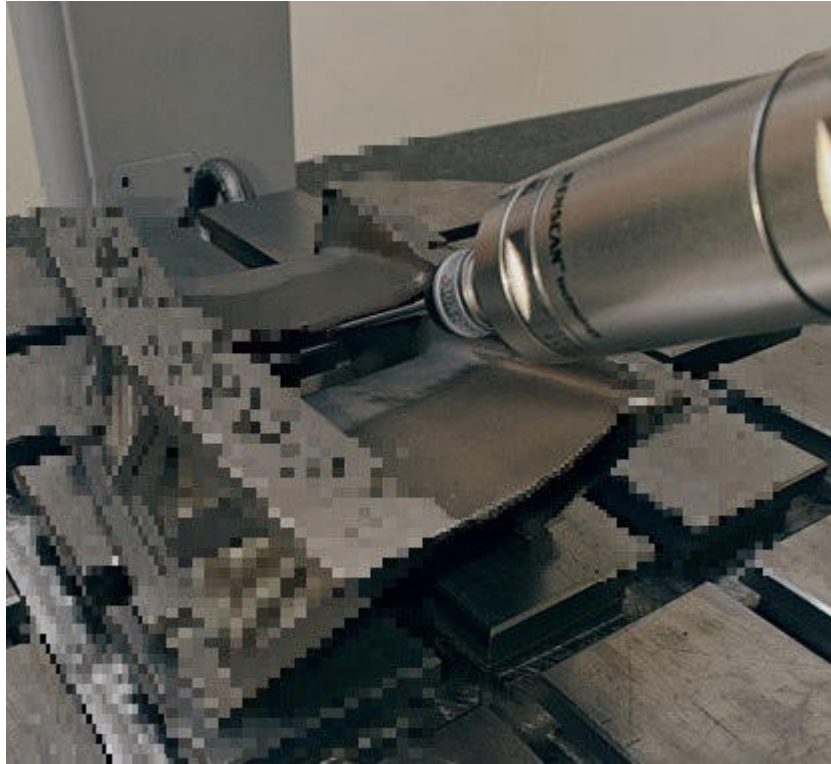


Рисунок 1.24 Измерение блока лопаток 1 ступени ТНД на координатно-измерительной машине, вид сбоку

Для упрощения задачи по измерению общей площади проходного сечения соплового аппарата единичного межлопаточного канала можно выполнять контрольные измерения единичной лопатки, что значительно снижает трудоёмкость процесса измерения геометрии и размеров лопатки, а также значительно повышает степень доступности измерительного щупа к контролируемым поверхностям лопатки (рисунок 1.25). В этом случае выполняется проверка определенных точек или сечений по результатам которых выполняется анализ отклонений реальной геометрии лопатки от конструкторской модели. А также выполняется измерение контрольных размеров. Но при этом фактически при оценке площади проходного сечения единичного межлопаточного канала не участвует вторая лопатка и контрольные размеры измеряются от номинального расположения пера рядом стоящей лопатки, а не от реальной геометрии второй сопловой лопатки.

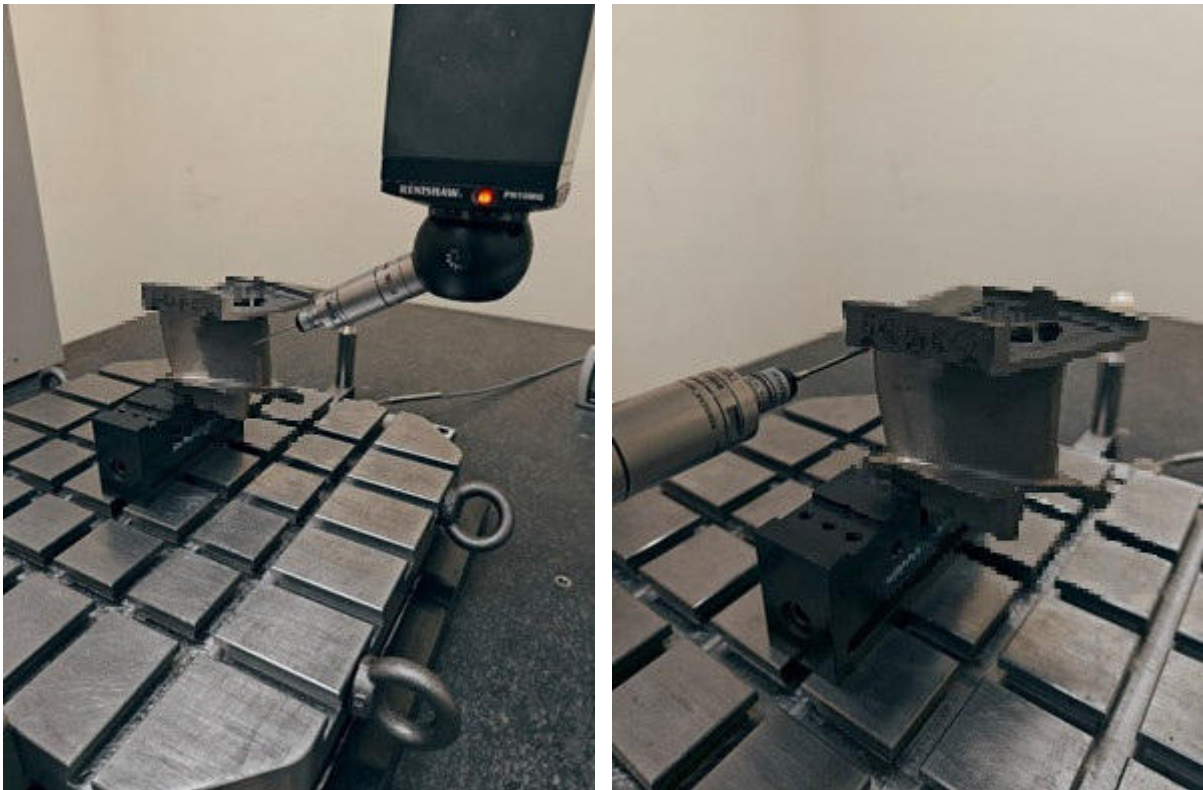


Рисунок 1.25 Измерение единичной лопатки 1 ступени ТВД на координатно-измерительной машине

Ряд таких допущений позволяет выполнять оценку стабильности процесса изготовления сопловой лопатки, но не позволяет выполнять фактическое измерение размеров между двумя рядом стоящими лопатками. Полученные измерения контрольных размеров являются косвенными.

В последнее время в производстве широкое распространение получили трехмерные оптические системы такие как ATOS III+TRITOP 3, с помощью которых можно быстро выполнить измерения больших и сложных объектов, деталей и сборочных единиц с высоким локальным разрешением и точностью.

Данные оптические системы оцифровки и измерений позволяют за короткое время и с высокой точностью оцифровать деталь сложной геометрии, которая имеет сложную конфигурацию поверхностей, а также система позволяет получить оцифрованную модель измеренной детали.

Бесконтактные оптические системы получили широкое распространение в автомобилестроении, турбостроении, авиастроении и аэрокосмической

промышленности, в производстве бытовой техники и медицине для оцифровки наружной поверхности как деталей, так и отдельных элементов изделий.

Удобство и простота использования оптической системы ATOS получило широкое распространение в опытном производстве АО «ОДК-Авиадвигатель». Применение данной системы позволяет контролировать как отдельные рабочие лопадки компрессора и турбины, сопловые лопадки, отлитые и паяные блоки лопаток, так и сборочные единицы. Метод оптического контроля позволяет получить информацию о том, насколько реальная геометрия детали отличается от конструкторской модели, по всем поверхностям отлитой или изготовленной детали, что существенно экономит время на анализ соответствия геометрии изготовленной детали требованиям чертежа. Чтобы проанализировать все поверхности детали с помощью контактного метода, потребуется в 2-5 раз больше времени на измерения, в зависимости от сложности и геометрии измеряемой детали.

Оптическая система ATOS состоит из сенсора ATOS с двумя камерами, модулем проектора, контроллером, блоком питания, а также компьютера и стойки для крепежа сенсора (рисунок 1.26, а) [114, 115].

Принцип действия систем основан на проецировании структурированного света на сканируемый объект. Контрастное изображение, спроецированное на объект, формирует на поверхности кодированный паттерн, что даёт возможность воссоздать его объёмную форму благодаря цифровым камерам, которые снимают изображения под углом к источнику света. Получение полной объёмной модели объекта заключается в проведении серии снимков, сделанных с разных сторон, и их последующем объединении в единое целое (рисунок 1.26, б) [114, 115].

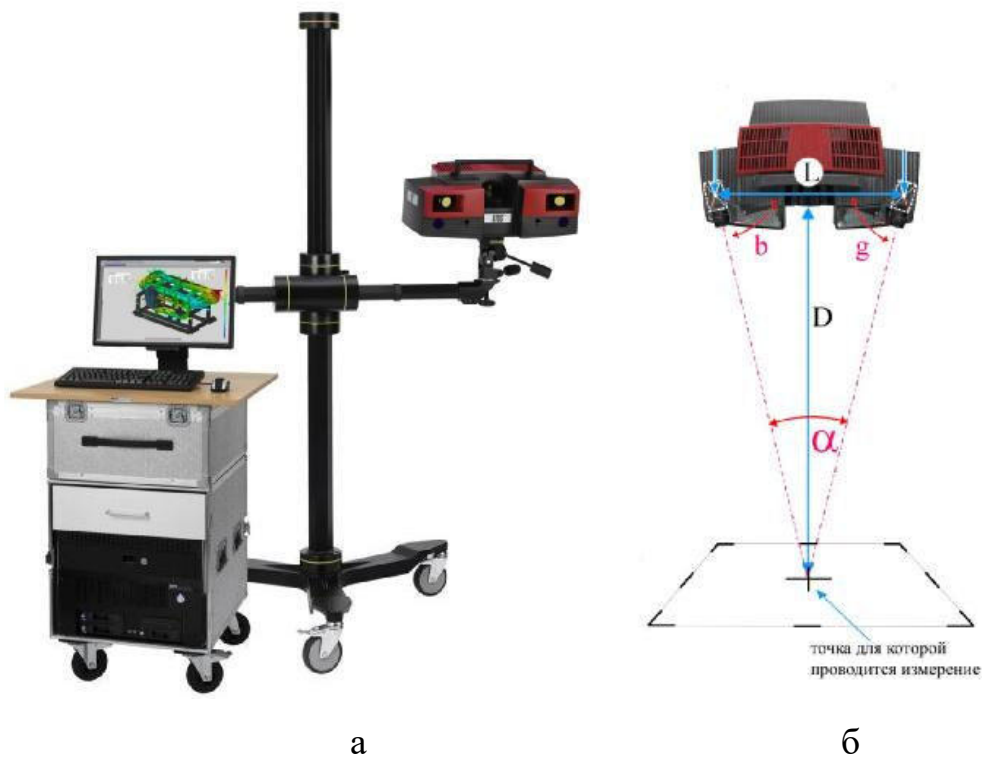


Рисунок 1.26 Внешний вид оптической измерительной системы (а) и принцип измерения системы (б) [114]

Оптический метод контроля получил широкое распространение в промышленном производстве для проверки геометрии турбинных лопаток, в том числе сопловых лопаток (рисунок 1.27). Активное использование оптического метода стало основой для дальнейшего развития анализа и решения более сложных задач, возникающих в производстве. Для решения задачи анализа и оценки общей площади проходного сечения соплового аппарата было решено использовать оптическую систему ATOS которая позволяет создавать оцифровку каждой сопловой лопатки и выполнять виртуальную сборку соплового аппарата в электронном виде.

Технические характеристики оптической измерительной системы ATOS III с учётом используемого сенсора и температуры окружающей среды от плюс 15 до 25°C и относительной влажности воздуха не более 85% (таблица 1.4) [115].



Рисунок 1.27 Рабочее место с оптической измерительной системой
ATOS III +TRITOP 3

Таблица 1.4 Характеристики оптической системы ATOS III

Характеристики системы:	ATOS III
Внешний вид:	
Измерительный объём, мм ³	от 150x150x130 до 2000x2000x2000
Расстояние до измеряемого объекта, мм	750 - 2700
Размеры оптической головки, мм ³	500/730x300x120
Расстояние между измеряемыми точками, мм	0,075 - 1,0
Шум при измерениях, мм	0,004 - 0,05

Развитием данного метода оптического контроля стала реализация возможности расчёта и прогнозирования общей площади проходного сечения соплового аппарата за счёт виртуальной сборки сопловых лопаток в сопловой

аппарат. Подробнее о данном методе изложено в диссертации Осипович Д.А. А благодаря разработанному алгоритму и программному обеспечению появилась возможность изменять порядок расстановки сопловых лопаток, выполнять частичную замену лопаток в виртуальной сборке соплового аппарата, что позволило достоверно прогнозировать и обеспечивать общую площадь проходного сечения соплового аппарата в серийном производстве. Разработанная Осипович Д.А. технология цифровой сборки сопловых аппаратов турбины газотурбинного двигателя на основе измерений лопаток фотограмметрическим методом [91] позволила сократить время выбора оптимальной расстановки лопаток в сопловом аппарате, что позволило реализовать выполнение конструкторского требования по обеспечению общей площади проходного сечения соплового аппарата с первого раза при наличии достаточного количества изготовленных сопловых лопаток [91].

Предложенный Осипович Д.А. метод перебора изготовленных сопловых лопаток в пределах одного комплекта лопаток не может обеспечить необходимого изменения общей площади проходного сечения, так как чаще всего требуется увеличить общую площадь проходного сечения соплового аппарата. А предложенный метод не позволяет существенно скорректировать изменение общей площади проходного сечения соплового аппарата, так как реальная геометрия лопаток не изменяется, а выполняется только селективная переборка и частичная замена сопловых лопаток в сопловом аппарате турбины согласно заложенного алгоритма перебора.

Для обеспечения работы, предложенного Осипович Д.А. метода, требуется большое количество лопаток, ориентировочно потребуется не менее двух-трёх комплектов лопаток, для выполнения виртуальной переборки соплового аппарата согласно заложенного алгоритма и ограничений в программном обеспечении.

Выводы: оптический контроль позволяет быстро выполнять измерение сложной геометрии детали такой как сопловая лопатка по сравнению с контактными методами контроля. Результаты измерений с помощью оптического

контроля более информативны и дают полное понимание о фактической геометрии сопловой лопатки поскольку выполняется измерение всех поверхностей детали, а не конкретного элемента или поверхности как при измерении контактными методами контроля. Кроме того, программное обеспечение для обработки данных оптического контроля делает процесс автоматизации обработки результатов контроля детали простой, гибкой и быстрой. На выполнение контроля детали контактным методом обычно тратится больше времени, и сам процесс измерения более трудоёмкий по сравнению с оптическими методами. В некоторых случаях для выполнения контроля контактным методом необходимо изготовить дополнительную оснастку, которая позволит удобно и однозначно закрепить деталь, а также упростит процесс контроля детали и поможет автоматизировать процесс измерения на координатно-измерительной машине. Оптический метод позволяет оценить сложную геометрию собранного соплового аппарата и реализовать возможность быстрого и эффективного измерения площади проходного сечения как межлопаточного канала, так и общей площади собранного соплового аппарата. Для реализации измерения общей площади собранного соплового аппарата контактным методом с помощью координатно-измерительной машины требуется определенная комплектация КИМ, а измерительная рука обладает низкой скоростью измерения, и её использование не позволяет автоматизировать процесс измерения соплового аппарата, так как все перемещения руки выполняет инженер по измерениям.

По совокупности преимуществ для решения задачи измерения площади проходного сечения соплового аппарата оптические методы контроля, а в частности ATOS, позволяет решить эту задачу лучше и быстрее по сравнению с другими методами контроля, а главное процесс измерения на ATOS может быть легко автоматизирован.

1.5 Анализ особенностей создания специального программного обеспечения управления технологическим процессом

Создание специализированного программного обеспечения для новой технологии обработки сопловых лопаток значительно облегчает работу технолога, позволяя ему убрать рутинные действия при подготовке производства к обработке нового комплекта сопловых лопаток. В случае отсутствия СПО технологу придётся каждый раз выполнять проверку фактической площади ППС СА, в большинстве случаев она не соответствует. После этого ему пришлось бы подбирать вручную угол разворота лопаток и проверять достаточно ли изменилась общая ППС СА, или требуется ещё увеличить или уменьшить угол разворота лопаток. И так придется повторять расчёт несколько раз пока площадь ППС СА не окажется в заданном допуске. Общее время, которое технолог потратит на проведение всех расчётов составит минимум две-три смены в зависимости от опыта работы технолога, а разработанное СПО выполняет все расчёты за три-четыре часа.

Специальное программное обеспечение представляет собой совокупность программ, используемых для решения определенных задач, чаще всего узконаправленных задач [51].

К специальному программному обеспечению относятся такие программы как «1С-бухгалтерия», «3D-max», «КонсультантПлюс» и многие другие. Специальное программное обеспечение предназначено для выбора из устоявшейся базы данных оптимального способа или метода решения, на основе разработанного и опробованного алгоритма [51].

Специальное программное обеспечение разделяется на два класса: общего и функционального назначения. Программы общего назначения реализуют экономико-математические и статистические методы, используемые при решении функциональных задач управления, а также методы организации и ведения базы данных. Программы функционального назначения реализуют функции управления и типовые алгоритмы обработки данных в АСУП [51].

В данной работе необходимо разработать специальное программное обеспечение, которое будет управлять процессом корректировки общей площади проходного сечения соплового аппарата. Если в процессе оценки площади проходного сечения соплового аппарата будет обнаружено несоответствие заданному значению, СПО автоматически рассчитает необходимый угол разворота сопловых лопаток, используя встроенную регрессионную зависимость. Расчёт угла выполняется итерационно, и процесс будет повторяться несколько раз, чтобы добиться наилучшего результата.

Специальное программное обеспечение разработано на языке программирования C++, который является компилируемым, статически типизированным языком программирования общего назначения. Специальное программное обеспечение представляет собой библиотеку *.dll для программы NX, которая предназначена для решения конкретной задачи по заложенному в неё алгоритму.

Выводы по главе 1

1. Установлено, что в процессе литья проточная часть и профиль пера отлитых сопловых лопаток имеют локальные отклонения геометрии свыше $\pm 0,3$ мм от заданной конструкторской геометрии, что не позволяет обеспечить сборку с требуемой общей площадью проходного сечения соплового аппарата с первого раза при использовании литейных баз, а именно точек К1-К6. Данные точки обеспечивают требуемое положение пера лопатки в пространстве. Установка лопатки в приспособлении осуществляется по данным точкам, от которых и формируются технологические базы на первой установке.

2. В результате коробления отливки перо лопатки отклоняется от требуемого значения, и при сборке таких лопаток в сопловой аппарат не обеспечивается общая площадь проходного сечения соплового аппарата после их сборки в узел. В среднем необходимо выполнить 2-3 переборки соплового аппарата для обеспечения требуемой общей площади проходного сечения

соплового аппарата в заданном допуске. Чаще всего требуется выполнить замену части лопаток из уже собранного комплекта на другие лопатки, отлитые из другой партии и обработанные по серийной технологии. Требуется наличие постоянного запаса обработанных сопловых лопаток для сборки соплового аппарата.

3. Анализ статистических данных о геометрических отклонениях пера сопловых лопаток после литья показал, что в 95% случаев при сборке сопловых аппаратов из таких лопаток не обеспечивается общая площадь проходного сечения сопловых аппаратов. Поэтому необходимо разработать методику и выполнить корректирующие действия, чтобы сопловой аппарат, собранный в сборочном цеху, обеспечивал необходимую общую площадь проходного сечения с первого раза и находился в пределах заданных допусков.

4. В ходе анализа серийного технологического процесса установлено, что для обработки лопатки используется большая номенклатура универсального шлифовального оборудования, используется большое число установочных и контрольных приспособлений, применяются низкопроизводительные режимы шлифования и шлифовальные круги со средней или открытой структурой, а также зачастую используется дискретная правка шлифовального круга.

5. Для обработки радиальных поверхностей на сопловой лопатке применяется модернизированный токарно-лобовый станок, на котором установлена специальная шлифовальная головка. А для закрепления комплекта лопаток используется специальный стапель, который устанавливается на шпиндель токарно-лобового станка. При обработке радиальных поверхностей на этом оборудовании правка шлифовального круга выполняется вручную, а охлаждение отсутствует, поскольку на станке отсутствуют защитные экраны. Обеспечение размеров выполняется за счёт метода пробных проходов, а точность размеров зависит от квалификации рабочего. Режимы резания при обработке соплового аппарата низкопроизводительные, поскольку отсутствует охлаждение при обработке, что способствует формированию условий для образования трещин на обработанных поверхностях лопатки. Контроль диаметральных поверхностей

на обрабатываемом сопловом аппарате с помощью измерительного инструмента весьма затруднён. Все эти факторы оказывают существенное влияние на точность и производительность изготовления сопловых лопаток, а также на последующую сборку соплового аппарата.

6. Проведённый анализ научных работ показал, что для повышения производительности и точности обработки ответственных деталей из жаропрочных сплавов необходимо использовать современный автоматизированный многоосевой шлифовальный станок с числовым программным управлением и процесс глубинного шлифования.

7. Проведённый литературный обзор позволил выбрать наиболее эффективный способ контроля как сопловых лопаток, так и всего соплового аппарата в сборе. Преимущество оптического метода контроля заключается в высокой скорости, оптимальной точности контроля и возможности автоматизации процесса контроля геометрии как сопловых лопаток, так и соплового аппарата. Применение данного метода контроля позволило минимизировать влияние человеческого фактора на результаты измерения общей площади проходного сечения соплового аппарата. Поскольку именно несовпадение результатов контроля общей площади проходного сечения соплового аппарата в механическом и сборочном цехах приводит к возврату уже собранного соплового аппарата на доработку в механический цех. В результате необходимо выполнять внеплановые работы по доработке соплового аппарата с целью обеспечить требуемую площадь проходного сечения соплового аппарата после сборки. В результате время сборки узла двигателя возрастает, что, в свою очередь, увеличивает общее время сборки газотурбинного двигателя.

8. Литературный обзор исследований в области обеспечения качества поверхностного слоя после шлифования показал, что внедрение глубинного шлифования в производство может существенно повысить производительность обработки, не снижая при этом качество поверхностного слоя. В работах Полетаева В.А., Волкова Д.И., Никитина С.П. [15, 16, 17, 76, 77, 78, 97, 99, 100]

обосновывается использование глубинного шлифования для обработки сложнопрофильных деталей турбины и деталей из жаропрочных сплавов. Применение глубинного шлифования при обработке деталей турбины, таких как сопловые и рабочие лопатки, позволяет полностью заменить традиционные методы шлифования.

9. На основании проведённого литературного анализа сделаны выводы по основным проблемам, связанным с обработкой сопловых лопаток и контролем одного из важнейших параметров соплового аппарата, такого как площадь проходного сечения соплового аппарата. Для решения этих проблем была сформулирована цель и определены задачи, необходимые для её достижения. Также были определены пути решения задач, направленных на повышение производительности и точности изготовления сопловых лопаток, а также на обеспечение требуемой площади проходного сечения соплового аппарата после сборки [65].

Глава 2. Обоснование возможности повышения производительности и точности обработки и сборки сопловых аппаратов на основе применения оптического контроля и корректирующего глубинного шлифования сопловых лопаток

2.1 Теоретическая обоснование возможности компенсации погрешности пера сопловой лопатки путём разворота на расчётный угол

В результате проведения анализа установлено, что при производстве газотурбинной техники существует проблема повышения производительности и точности обработки сопловых лопаток с обеспечением общей площади проходного сечения соплового аппарата при сборке соплового аппарата из этих лопаток. Другой проблемой обеспечения компенсации погрешности литья при дальнейшей механической обработке изделий. [68, 69, 70] Для того, чтобы выполнить механическую обработку [68] необходимо учитывать фактическую геометрию пера лопатки и проточной части, чтобы обеспечить площадь проходного сечения соплового аппарата в сборе. На положение пера лопатки в пространстве оказывают влияние поверхности, на которых расположены базовые точки, которые в свою очередь, обеспечивают связь между виртуальной осью лопатки и пером лопатки. Сопловые лопатки изготавливаются литьём по выплавляемым моделям. Однако из-за множества факторов, влияющих на процесс литья, и малого числа факторов, на которые можно оказать воздействие и гарантированно управлять, процесс литья лопаток отличается высокой нестабильностью. Из-за этого геометрия пера лопатки в большинстве случаев отклоняется от своего номинального положения. В результате при обработке установочных поверхностей лопатки методом глубинного шлифования от литых базовых точек геометрия пера лопатки оказывается смещённой относительно этих точек. В итоге сопловые лопатки, которые были изготовлены с соблюдением всех технологических требований к точности расположения обработанных поверхностей лопатки к оси лопатки, а, следовательно, и к литым точкам К1-К6

(рисунок 2.1), при сборке соплового аппарата не обеспечивают требуемую общую площадь проходного сечения соплового аппарата.

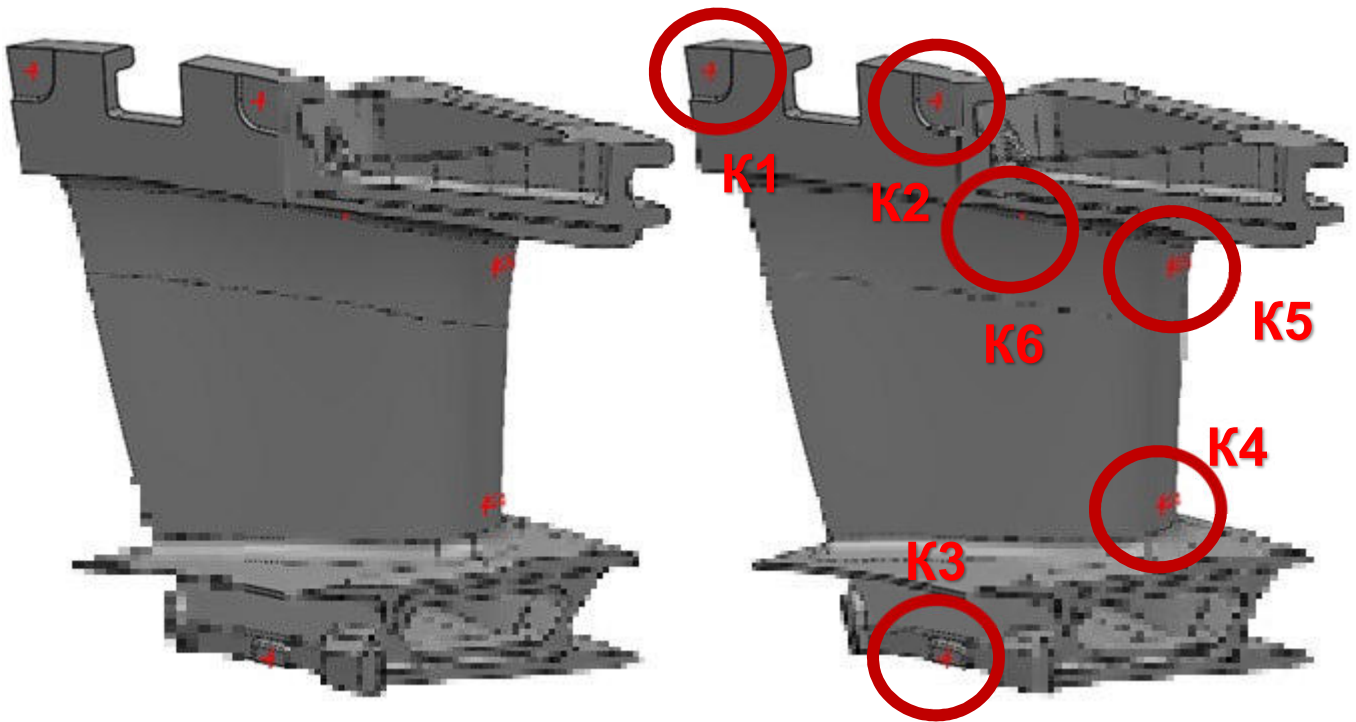


Рисунок 2.1 Базовые точки К1-К6 на геометрической модели
сопловой лопатки

В процессе предварительных исследований установлено, что коррекция отклонений геометрии пера лопатки возможна за счёт разворота сопловой лопатки вокруг своей оси.

Выдвинута гипотеза, что корректировка отклонений геометрии профиля пера отлитых сопловых лопаток с обеспечением общей площади проходного сечения соплового аппарата возможно за счёт применения оптического контроля фактической геометрии пера лопатки и разворота лопатки вокруг своей оси. Расчёт угла разворота осуществляется с помощью специального программного обеспечения с формированием файла с информацией о смещениях и поворотах приспособления для стойки станка с ЧПУ. Затем выполняется корректирующее глубинное шлифование базовых поверхностей сопловой лопатки на многоосевом шлифовальном станке с ЧПУ.

Повышение производительности, точности и качества поверхностного слоя

при обработке базовых поверхностей лопатки обеспечивается за счёт применения нового многоосевого шлифовального станка с ЧПУ, увеличения числа обрабатываемых поверхностей лопатки за одну установку, применения высокопористых шлифовальных кругов, их непрерывной правки и балансировки, автоматической смены шлифовальных кругов, управляемой и высоконапорной подачи СОЖ в зону резания [67, 77, 110, 148], использования рациональных режимов глубинного шлифования лопаток. Процесс корректировки отклонения профиля пера лопатки выполняется за счёт разворота сопловой лопатки вместе с приспособлением на расчётный рациональный угол (γ) (рисунок 2.3 и 2.4) [67]. Разворот лопатки с приспособлением осуществляется за счёт наклонно-поворотного стола, который является частью шлифовального станка с ЧПУ. Разворот наклонно-поворотного стола осуществляется по команде, подаваемой со стойки станка с ЧПУ. Затем выполняется глубинное шлифование припуска (Пр) на обрабатываемых поверхностях сопловой лопатки.

Для расчёта угла разворота и обеспечения необходимой площади проходного сечения соплового аппарата в заданном допуске, а также для учёта фактической геометрии пера каждой сопловой лопатки разработано СПО для программы NX. СПО по данным оптического контроля фактической геометрии пера лопатки рассчитывает усреднённый угол разворота (γ) для всех лопаток, входящих в комплект соплового аппарата (рисунок 2.2).

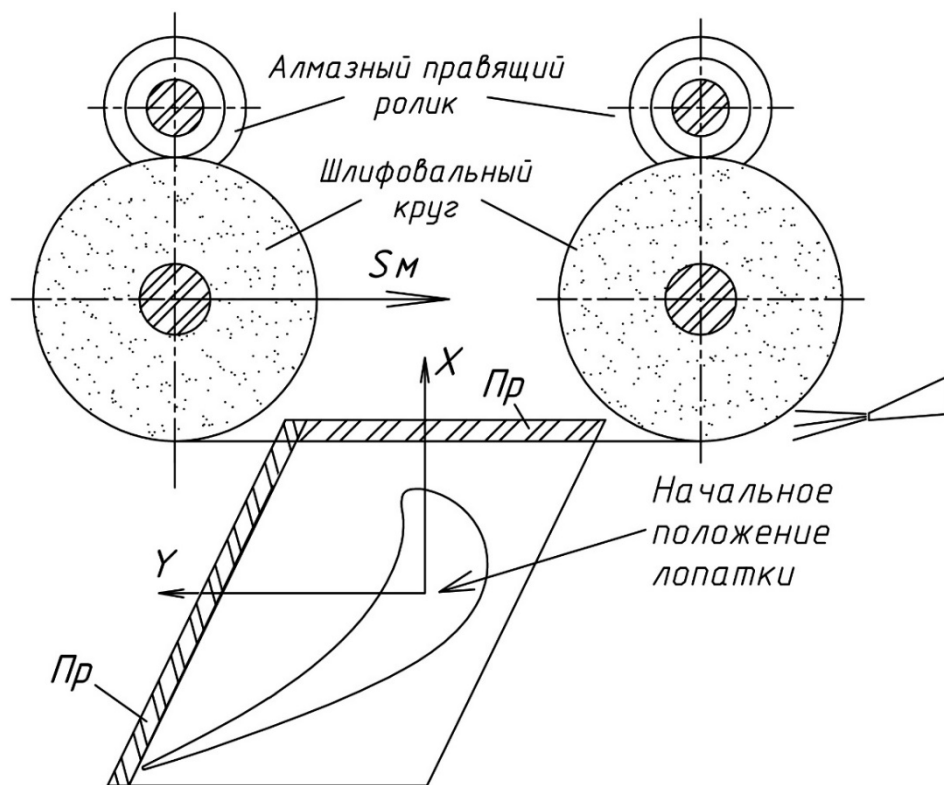


Рисунок 2.2 Обработка установочных поверхностей лопатки, начальное положение сопловой лопатки (без разворота)

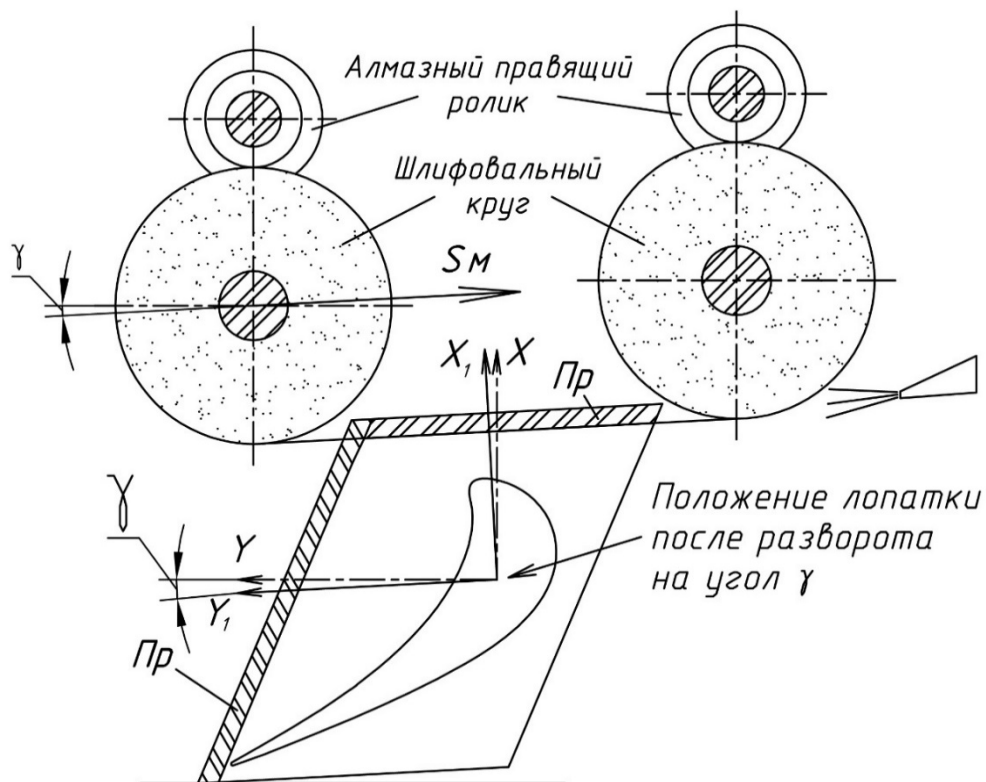


Рисунок 2.3 Для обработки установочных поверхностей лопатки, развёрнутое на угол положение лопатки

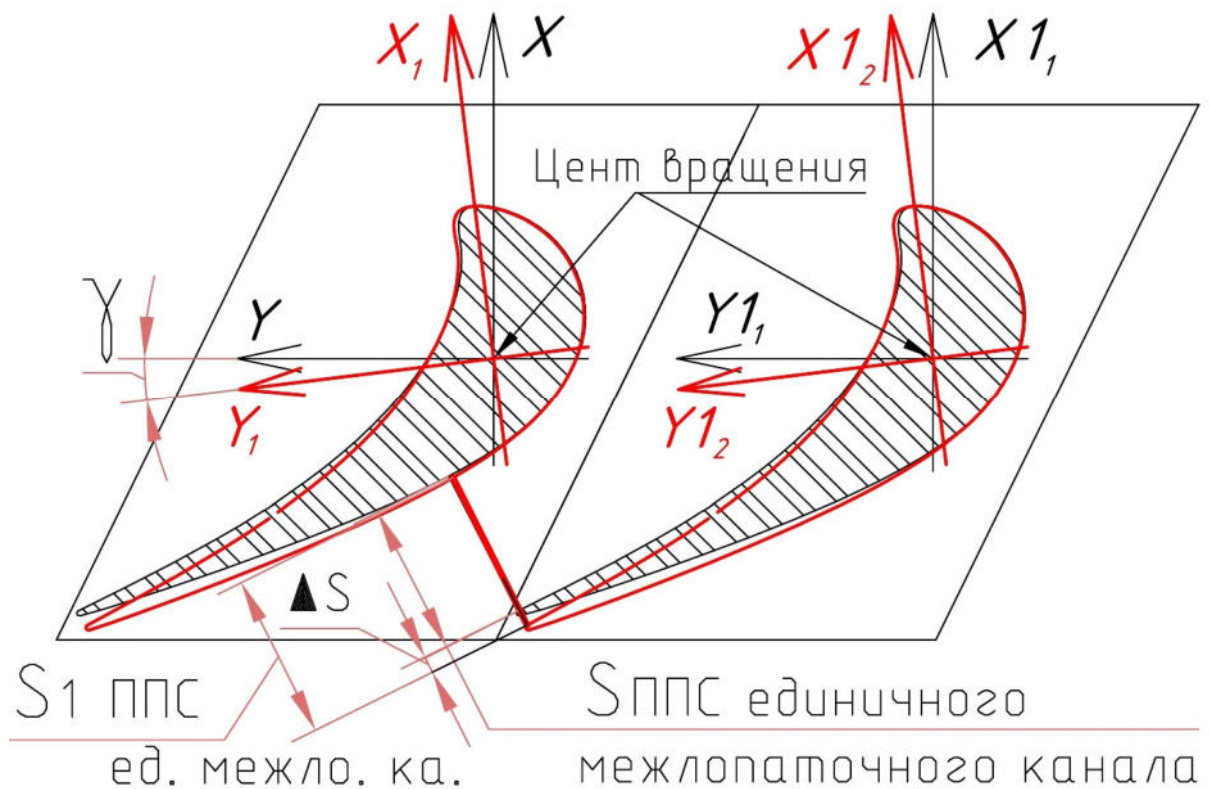


Рисунок 2.4 Схема разворота лопатки с последующим корректирующим глубинным шлифованием на многоосевом шлифовальном станке с ЧПУ

При этом угол разворота (γ) должен учитывать фактический припуск (Pr) на обрабатываемых поверхностях лопатки, который обычно составляет от 1 до 1,5 мм. Затем специальное программное обеспечение рассчитывает файл для станка ЧПУ, который содержит смещения и углы разворота лопатки вместе с приспособлением для многоосевого шлифовального станка с ЧПУ. Обработка установочных поверхностей всех сопловых лопаток, входящих в комплект соплового аппарата, выполняется с данным файлом на многоосевом шлифовальном станке с ЧПУ.

2.2 Установление взаимосвязи между углом разворота и общей площадью проходного сечения соплового аппарата

На основании анализа статистических данных, полученных ранее при оцифровке сопловых лопаток, построена эмпирическая линейная регрессионная зависимость (1) изменения общей площади проходного сечения соплового

аппарата от угла разворота сопловой лопатки, что позволяет рассчитать фактическую ППС СА до начала обработки лопаток на станке с ЧПУ. Файл для станка с ЧПУ позволяет повернуть перо сопловой лопатки на расчётный угол, что в итоге позволяет обеспечить необходимую общую ППС СА.

$$S_{\text{общая ППС СА}} = 151,67\gamma + 42121 \quad (1)$$

Разработанная регрессионная зависимость расчёта изменения общей площади проходного сечения соплового аппарата от угла разворота сопловых лопаток имеет следующие граничные условия:

- припуск на обрабатываемых поверхностях 1...1,5 мм;
- угол разворота сопловой лопатки должен быть не больше ± 1 град;
- для обработки лопатки применяется 5-ти осевой шлифовальный станок с ЧПУ с интегрированным наклонно-поворотным столом.

На рисунке 2.5 представлен график линейной регрессионной зависимости площади проходного сечения соплового аппарата от угла разворота сопловой

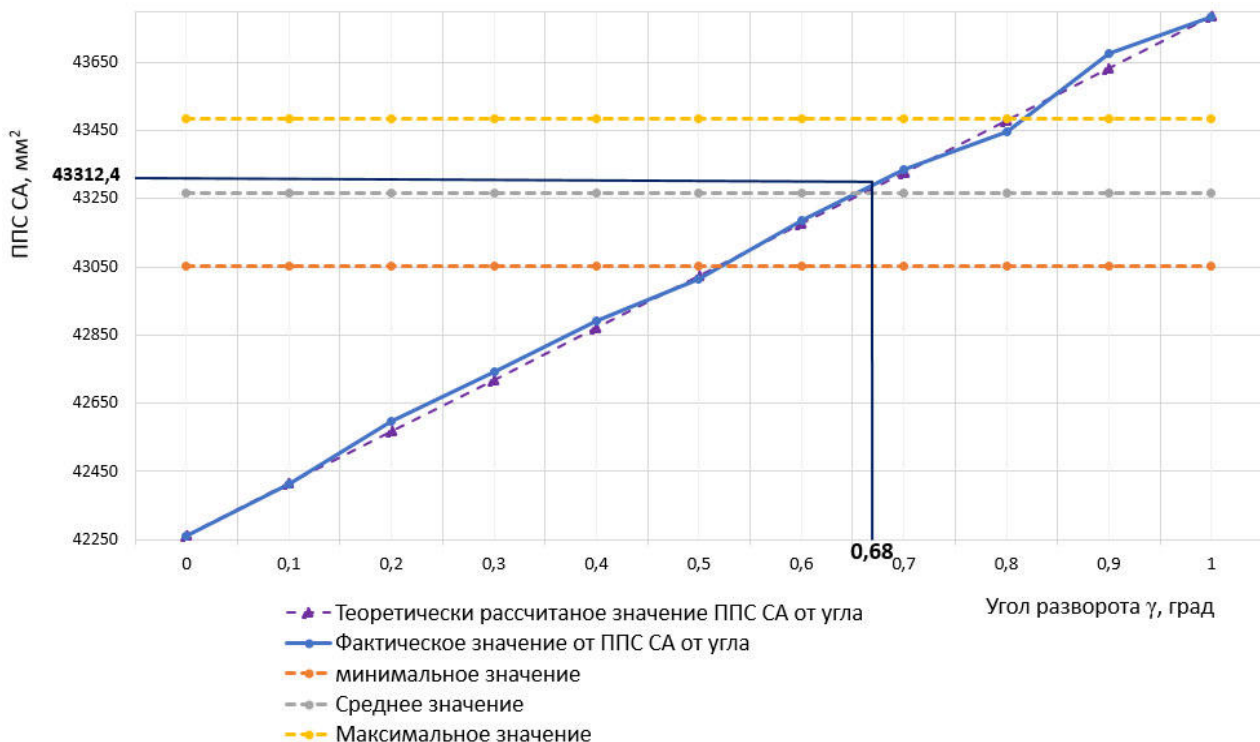


Рисунок 2.5 График зависимости ППС СА от угла разворота сопловой лопатки вокруг своей оси

лопатки вокруг виртуальной оси лопатки. Данная регрессионная зависимость используется в СПО для расчёта рационального угла разворота путём последовательного итерационного перебора с обеспечением общей площади проходного сечения соплового аппарата в середине заданного поля допуска.

2.3 Разработка алгоритмов и этапов подготовки, а также расчёт общей площади проходного сечения соплового аппарата для комплекта сопловых лопаток

Для реализации выдвинутой гипотезы разработан алгоритм и специальное программное обеспечение, связывающее отдельные этапы нового технологического процесса. Алгоритм, модель и этапы этого взаимодействия приведены на рисунке 2.6.

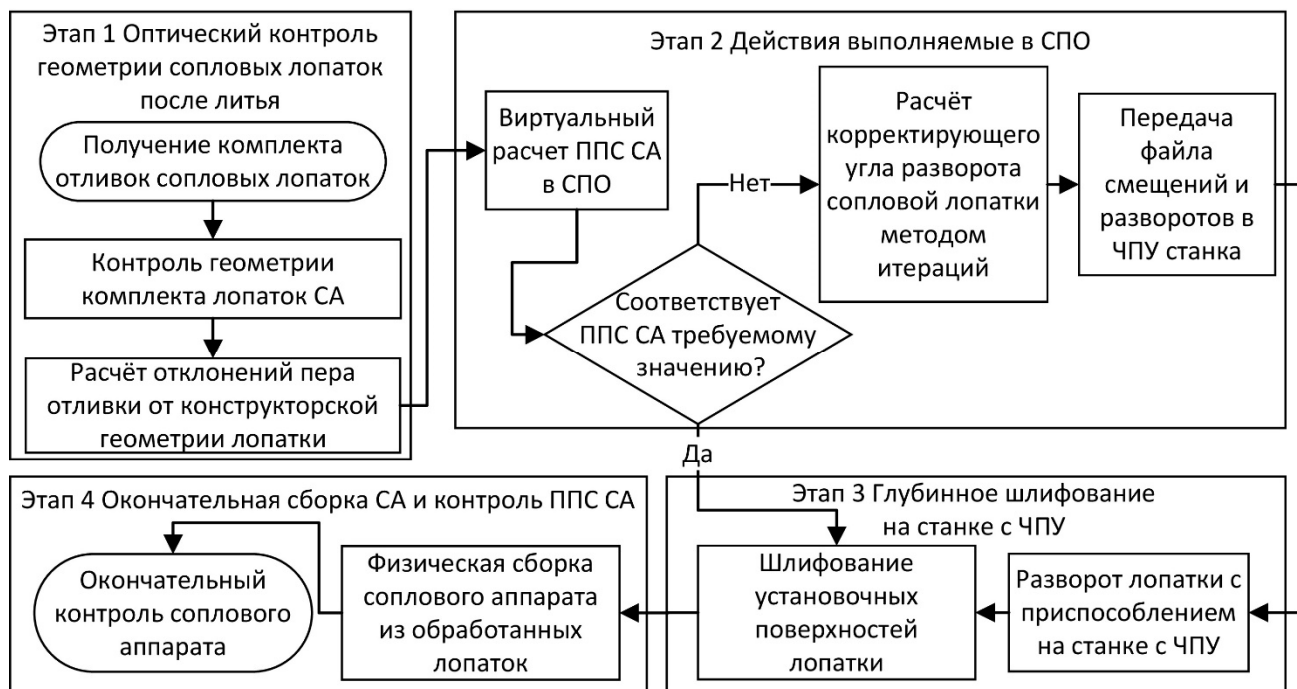


Рисунок 2.6 Блок-схема алгоритма и этапы нового технологического процесса изготовления сопловых лопаток и сборки соплового аппарата

Разработанный алгоритм нового технологического процесса предусматривает следующие четыре основных этапа:

1) Оптический контроль комплекта сопловых лопаток, полученных после литья, на соответствие фактической геометрии пера требованиям

конструкторской документации с расчётом фактических отклонений пера лопатки.

В этот этап входит получение комплекта отливок из литейного цеха с последующей передачей на контроль толщины стенок лопатки с помощью томографа. После лопатки обязательно проверяют с помощью ЛЮМ-контроля на наличие трещин и раковин на поверхности отливки. Затем выполняется окончательный визуальный контроль лопаток на наличие видовых дефектов сопловой лопатки.

Для анализа геометрии сопловой лопатки и проверки соответствия геометрии пера заданному допуску, выполняется оцифровка каждой отливки с помощью оптической системы ATOS. Привязка конструкторской геометрической модели сопловой лопатки к оцифрованной модели лопатки выполняется по 6 базовым точкам К1-К6. По 6 точкам выполняется совмещение оцифрованной модели отливки (фасетного тела) с геометрической моделью сопловой лопатки (рисунок 2.7).

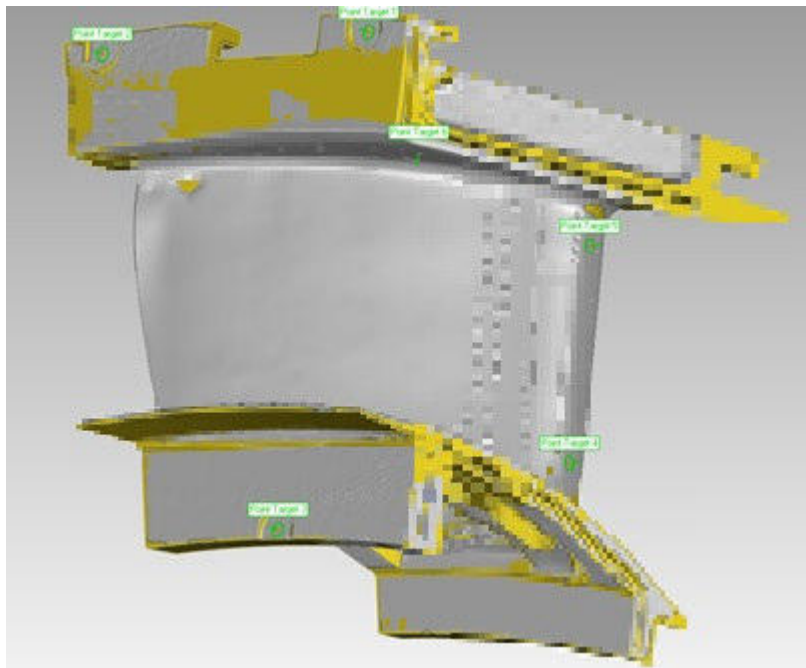


Рисунок 2.7 Совмещение фасетного тела оцифрованной отливки с конструкторской геометрической моделью сопловой лопатки

Совмещение лопатки выполняется по наилучшему совпадению 6 точек (K1-K6), при этом в программном обеспечении Geomagic используется алгоритм совмещения best-fit, который позволяет наилучшим образом притягивать поверхности оцифрованной модели лопатки в местах расположения точек K1-K6 к точкам K1-K6 на геометрической модели сопловой лопатки (рисунок 2.8). Затем выполняется сохранение файла привязанной модели лопатки в формате *.stl на сетевой диск предприятия для удобства использования этих данных разными пользователями. Далее эти *.stl файлы (оцифровки) будут использоваться для виртуального построения соплового аппарата и расчёта площади проходного сечения соплового аппарата в специальном программном обеспечении.

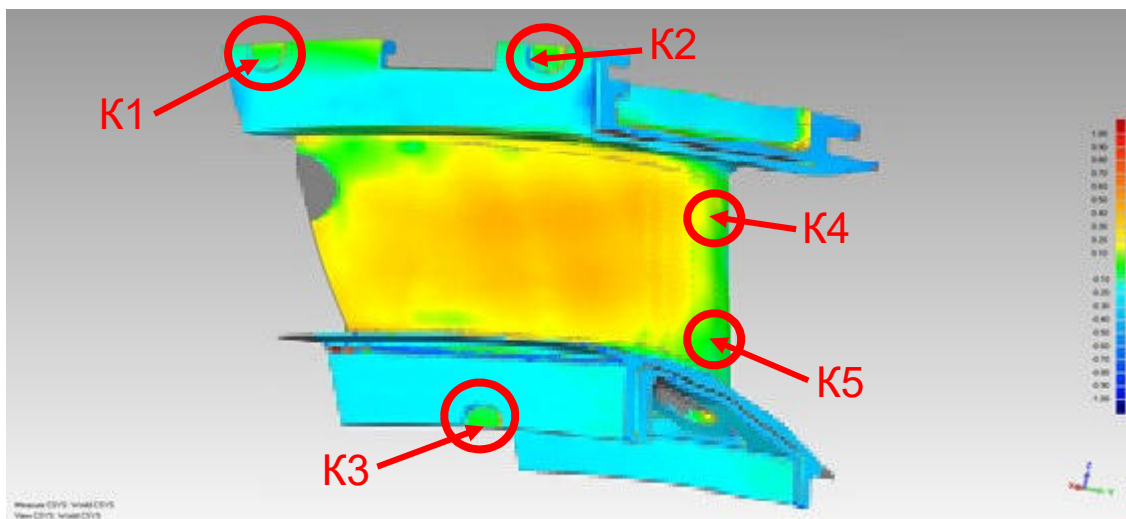


Рисунок 2.8 Совмещение оцифрованной модели отливки с номинальной геометрической моделью лопатки по точкам к1-к6

После выполнения привязки можно по графической картинке и цветовому градиенту определить припуск на лопатке, также оценить реальную геометрию сопловой лопатки (рисунок 2.9).

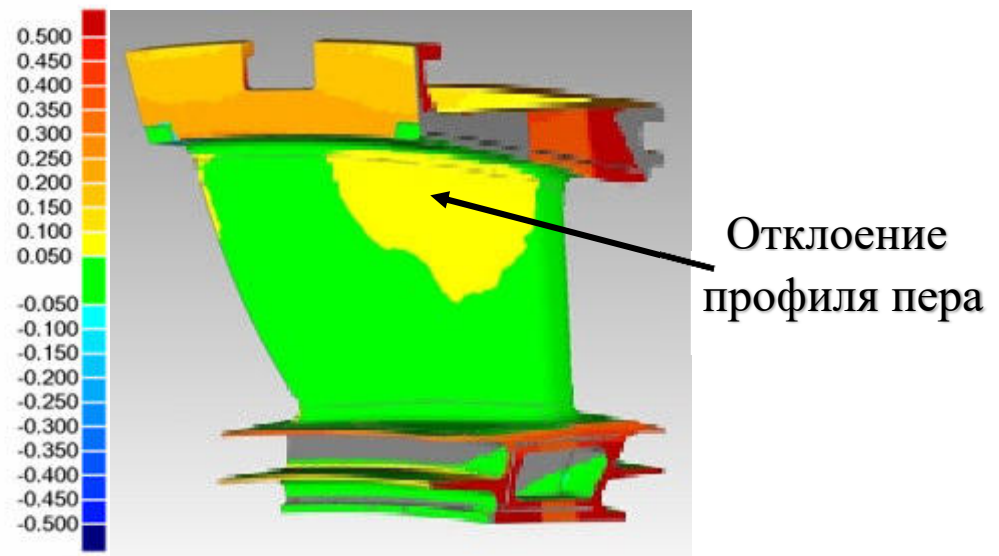


Рисунок 2.9 Результаты контроля реального отклонения геометрии профиля пера сопловой лопатки после литья от конструкторской геометрической модели.

Затем с помощью программы Geomagic проверяется наличие необходимого припуска на установочных поверхностях лопатки под механическую обработку. Минимальное значение припуска на таких поверхностях, должно быть, не менее 0,2 мм. После выполнения анализа лопатки в программе Geomagic формируется графический протокол измеренной сопловой лопатки с выносками, где указаны фактические значения припуска на обрабатываемых поверхностях лопатки (рисунок 2.10).

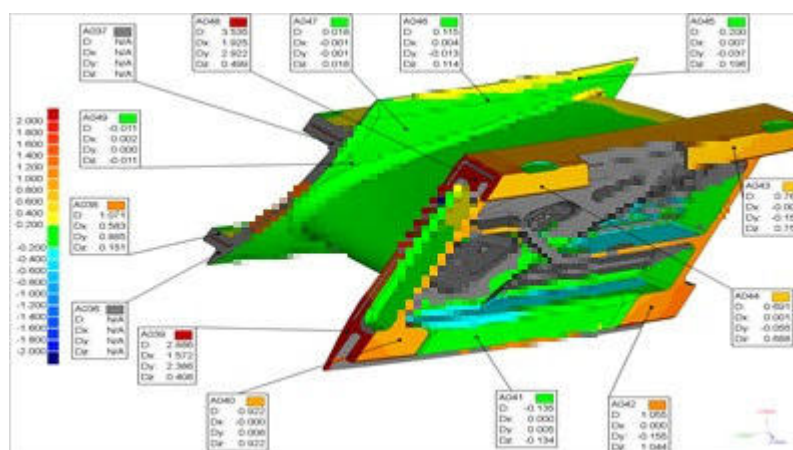


Рисунок 2.10 Графический отчёт с выносками, где указаны отклонения геометрии оцифрованной модели отливки относительно номинальной геометрической модели сопловой лопатки

После прохождения всех этапов контроля выполняется передача готового комплекта сопловых лопаток из литейного в механический цех для их дальнейшей механической обработки.

2) Передача полученных данных оптического контроля фактической геометрии пера в специальное программное обеспечение, разработанное для нового технологического процесса, с заданием ограничений для выполнения расчёта и подбора оптимального угла разворота для комплекта сопловых лопаток [70, 103, 137].

Полученные на предыдущем этапе оцифрованные модели сопловых лопаток, которые расположены на сетевом диске, загружаются в специальное программное обеспечение (рисунок 2.11) [70, 103, 137].

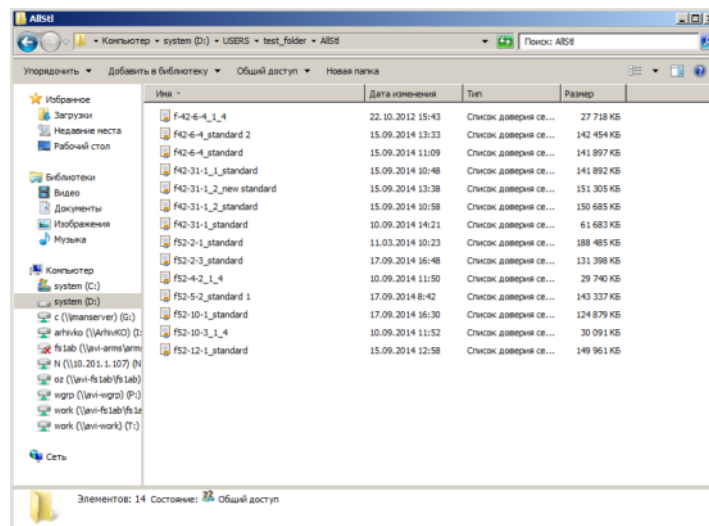


Рисунок 2.11 Папка с оцифрованными моделями сопловых лопаток в формате *.stl

Специальное программное обеспечение, допускает любое название файлов *.stl, но чаще всего указывается номер лопатки, который был нанесён во время литья лопатки. Типовой формат имени лопатки «Номер отливки.stl», сохранение данного номера позволяет отслеживать полный цикл производства лопатки от литья до установки обработанной лопатки в готовый узел. Например, «Лопатка №1.stl» данное именование оцифрованной лопатки будет в дальнейшем использоваться для обозначения отливок в файле программы NX.

После задания места расположения файлов с оцифрованными лопатками после литья на сетевом диске предприятия необходимо в меню СПО указать следующие данные: общую площадь проходного сечения соплового аппарата, допуск на общую площадь, количество лопаток в сопловом аппарате, включить проверку величины припуска на обрабатываемых поверхностях лопатки (рисунок 2.12).

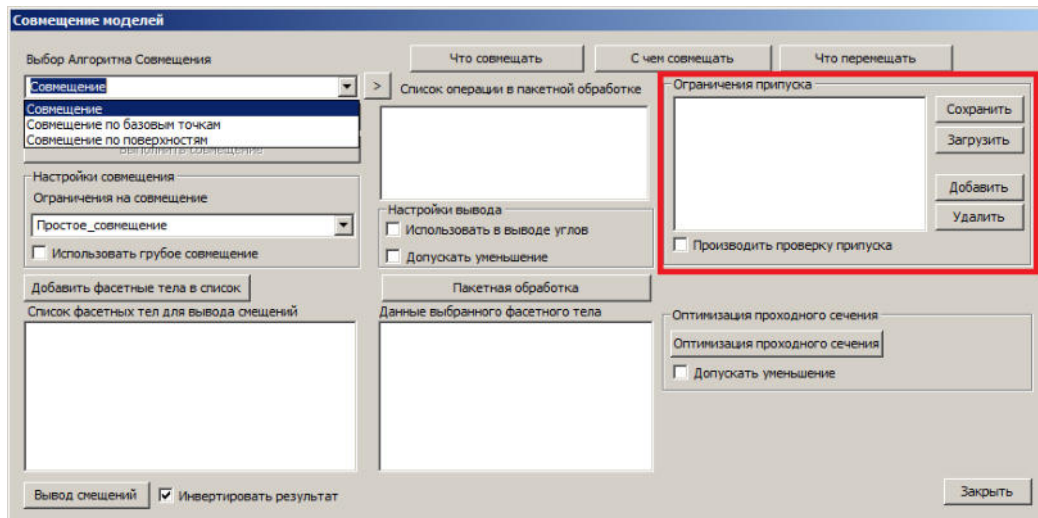


Рисунок 2.12 Меню специального программного обеспечения, после запуска

Окно меню специального программного обеспечения после загрузки исходных данных (рисунок 2.13).

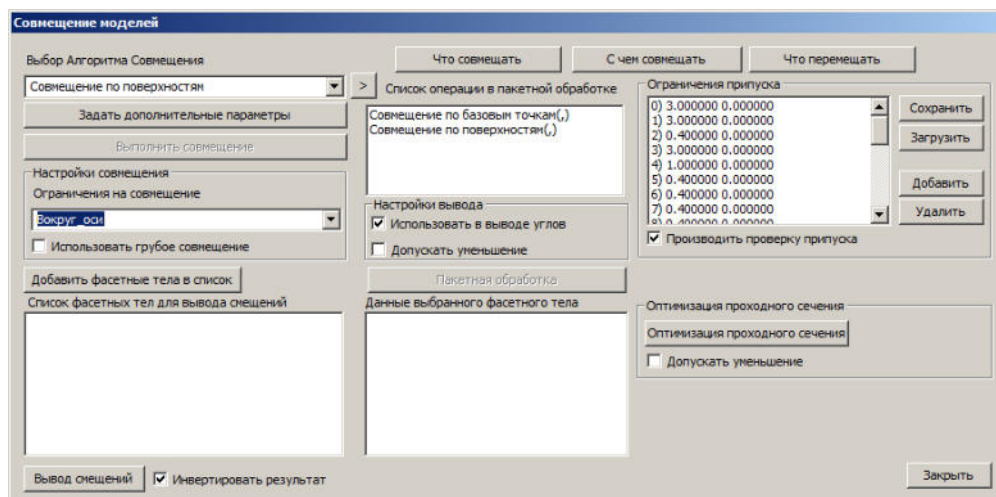


Рисунок 2.13 Окно специального программного обеспечения после задания всех ограничений

На основе программы NX и с применением СПО, строится площадь проходного сечения межлопаточного канала для каждой пары лопаток в автоматическом режиме по заложенному алгоритму. Из загруженных в специальное программное обеспечение оцифрованных лопаток собирается виртуальная сборка соплового аппарата в программе NX. Эта виртуальная сборка соплового аппарата аналогична геометрической модели соплового аппарата (рисунок 2.14), только она собирается из фасетных лопаток, смотри рисунок 2.15.

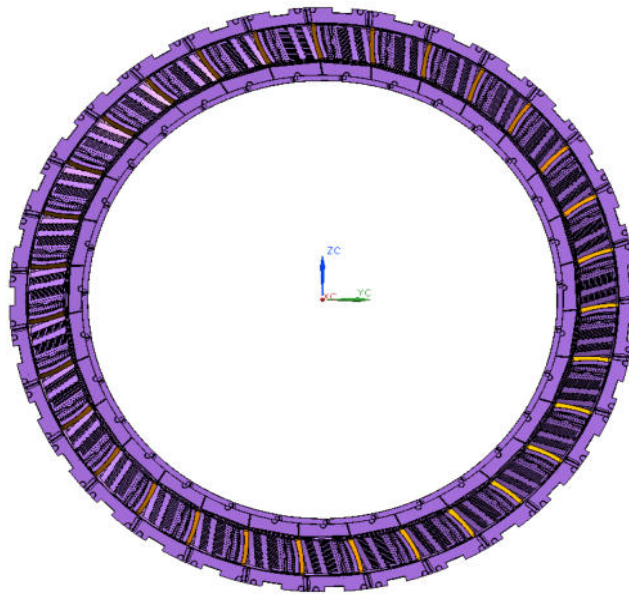


Рисунок 2.14 Сборка соплового аппарата, из геометрических моделей, построенных в программе NX

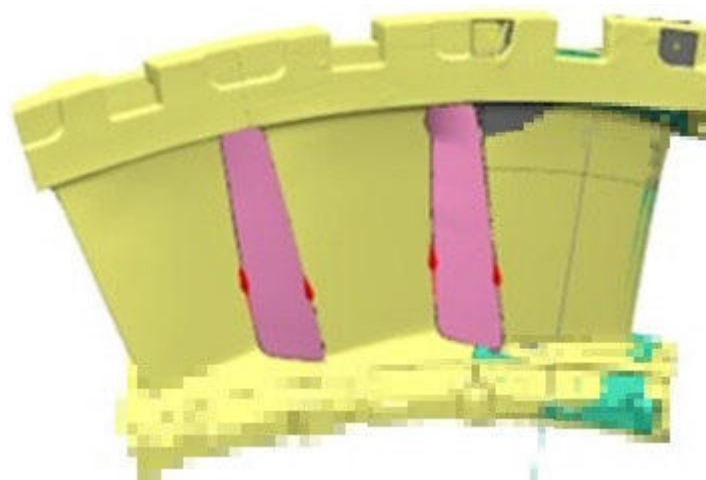


Рисунок 2.15 Часть сборки соплового аппарата из фасетных лопаток

СПО выполняет построение площади проходного сечения единичного межлопаточного канала. Чтобы рассчитать площадь межлопаточного канала, СПО строит плоскость через ребро выходной кромки пера лопатки, при этом плоскость перпендикулярна спинке пера рядом стоящей лопатки, смотри рисунок 2.16.

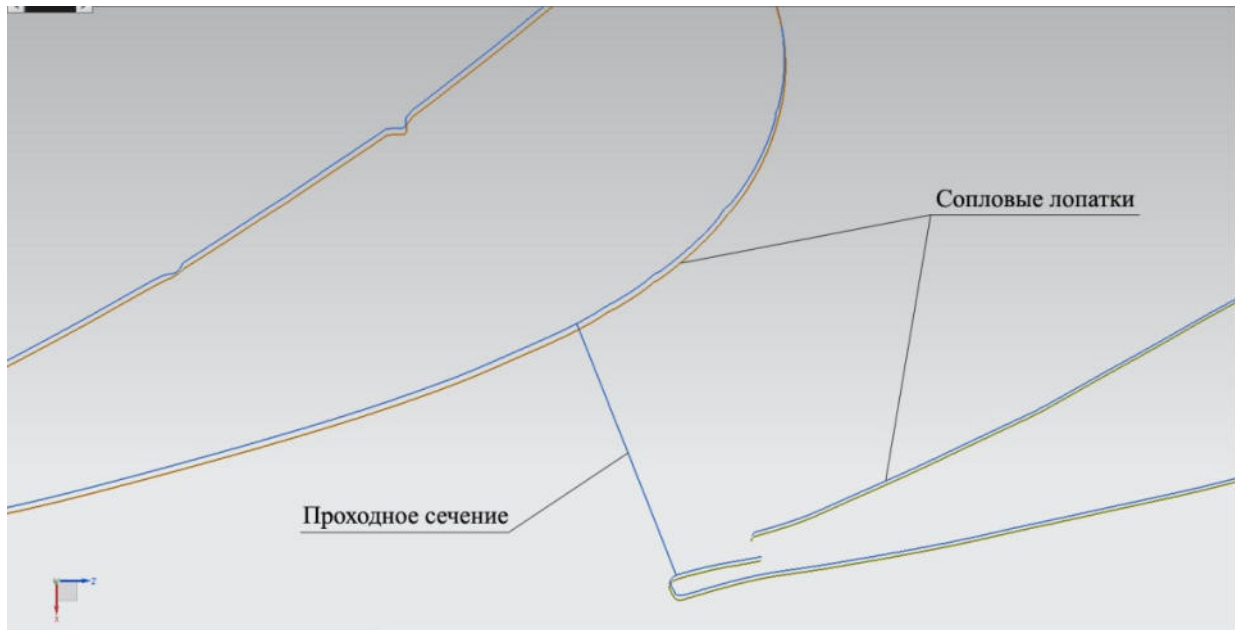


Рисунок 2.16 Представлено сечение межлопаточного канала, для которого вычисляется площадь проходного сечения между соседними сопловыми лопатками

Полученная поверхность будет являться площадью проходного сечения межлопаточного канала для пары рядом стоящих сопловых лопаток. Результат этого построения в программе NX представлен на рисунках 2.17 и 2.18. Данная поверхность будет изменяться от одного канала к другому, поскольку геометрическая фигура площади для каждой пары лопаток уникальна. Из-за этого площадь каждого межлопаточного канала будет изменяться в зависимости от фактического отклонения пера лопатки и реальной геометрии самой лопатки.

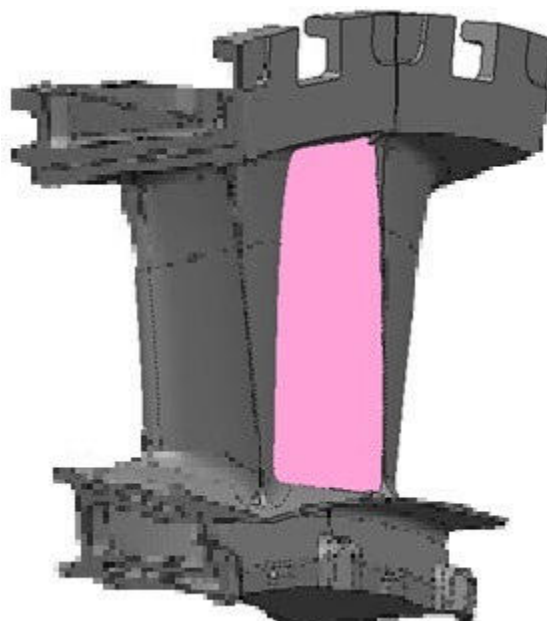


Рисунок 2.17 Розовым цветом указана поверхность, которая является площадью проходного сечения единичного межлопаточного канала для двух рядом стоящих лопаток

После того как поверхность построена, необходимо провести анализ площади фактической поверхности, которая и является площадью проходного сечения межлопаточного канала, смотри рисунок 2.18.

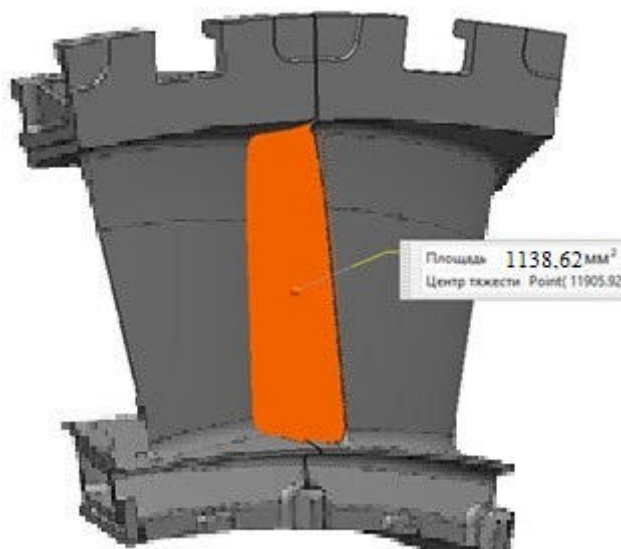


Рисунок 2.18 Выделена площадь проходного сечения единичного межлопаточного канала между рядом стоящими сопловыми лопатками для геометрической модели

Для оцифрованных лопаток выполняется построение плоскости по аналогичному алгоритму, в результате чего формируется поверхность между двумя оцифрованными лопатками, смотри рисунок 2.19. Данная поверхность является аналогом фактической поверхности между двумя рядом стоящими лопатками, которая получится при сборке реального соплового аппарата.

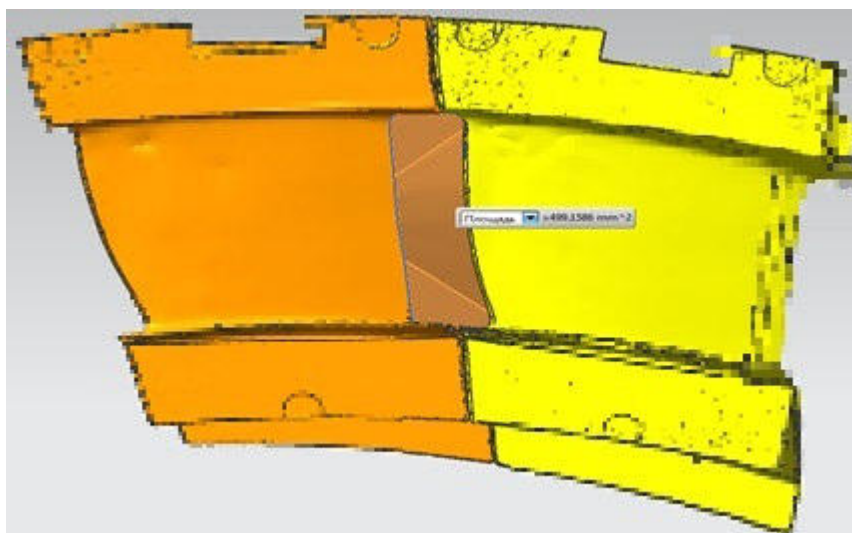


Рисунок 2.19 Указана прогнозируемая площадь проходного сечения единичного межлопаточного канала между рядом стоящими сопловыми лопатками для оцифрованных лопаток

После того как для оцифрованных лопаток, собранных в сопловой аппарат, рассчитываются единичные площади для каждого межлопаточного канала, все эти площади суммируются. Полученная сумма представляет собой общую площадь проходного сечения соплового аппарата. По результатам сравнения реальной и теоретической площади формируется протокол с фактическими значениями площади для каждого межлопаточного канала и общей площади проходного сечения соплового аппарата, смотри рисунок 2.20.

29	0.000000 0.000000	1142,442047 1142,442047
30	0.000000 0.000000	1138,518922 1138,518922
31	0.000000 0.000000	1140,487405 1140,487405
32	0.000000 0.000000	1136,73211 1136,73211
33	0.000000 0.000000	1134,731743 1134,731743
34	0.000000 0.000000	1135,840135 1135,840135
35	0.000000 0.000000	1144,145471 1144,145471
36	0.000000 0.000000	1140,810478 1140,810478
37	0.000000 0.000000	1135,772244 1135,772244
38	0.000000 0.000000	1131,730707 1131,730707
Номинальная площадь, мм ²	Реальная площадь, мм ²	
34,354.280000	33,497.171807	

Рисунок 2.20 Протокол отчёта площадь проходного сечения единичного межлопаточного канала между рядом стоящими сопловыми лопатками для оцифрованных лопаток

В случае, если площадь ППС СА не укладывается в заданный допуск, то СПО запускает расчёт корректирующего угла разворота лопаток. В специальном программном обеспечении заложена разработанная регрессионная зависимость, которая позволяет выполнить расчёт необходимого угла разворота γ лопаток для всего комплекта сопловых лопаток с помощью итерационного перебора. При расчёте угла разворота γ лопаток специальное программное обеспечение учитывает величину фактического припуска на обрабатываемых поверхностях

лопатки таким образом, чтобы на базовых поверхностях после разворота остался припуск для шлифования обрабатываемых поверхностей, а площадь находилась в середине заданного допуска. Допускается угол разворота лопатки не более $\pm 1^\circ$, смотри рисунок 2.21. Данное ограничение связано с величиной припуска на обрабатываемых поверхностях лопатки, величина припуска обычно не превышает 1...1,5 мм. Если угол разворота всё же оказывается больше 1 град., то после окончания расчёта и построения виртуального соплового аппарата, специальное программное обеспечение выводит сообщение об ошибке с указанием необходимого угла разворота для текущего комплекта лопаток.

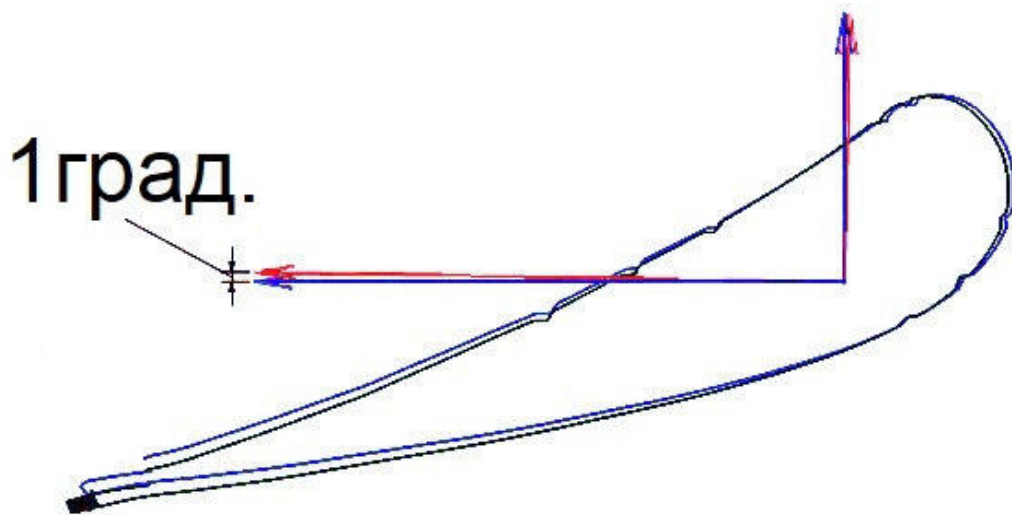


Рисунок 2.21 Показано изменение положения лопатки при её развороте на 1 град.

Рассчитанный угол разворота сопловой лопатки позволяет частично компенсировать погрешности литья и скорректировать общую площадь проходного сечения соплового аппарата. В большинстве случаев требуется увеличить значение общей площади. Процесс начинается с расчёта фактической площади проходного сечения соплового аппарата без смещения лопаток. Затем подбирается оптимальный угол разворота лопаток, для чего применяется линейная регрессионная зависимость и итерационный метод. В результате

разворота фактическая геометрия пера лопатки приближается к геометрической модели, заданной конструктором геометрической модели пера лопатки.

После этого с помощью специального программного обеспечения осуществляется виртуальный разворот лопаток на рассчитанный угол. Затем вновь рассчитывается общая площадь проходного сечения соплового аппарата.

На основе рассчитанного угла разворота специальное программное обеспечение создаёт файл для стойки многоосевого шлифовального станка с числовым программным управлением. Этот файл содержит линейные смещения и углы разворота приспособления, в котором закреплена сопловая лопатка. Данный файл позволяет преобразовать рассчитанный угол разворота лопатки вокруг своей оси в смещения и углы поворота лопатки вместе с приспособлением, установленным на паллете.

При расчёте файла со смещениями и разворотами приспособления необходимо учитывать расположение приспособления на паллете относительно фактического центра вращения паллеты, установленной на стол станка с ЧПУ. Это данные позволяют корректно рассчитать файл и выполнить разворот лопатки на расчётный угол вокруг своей оси.

Окончательным результатом выполненного расчёта специального программного обеспечения являются следующие выходные данные:

- Файл программы NX, а именно модуля CAD, который включает сборку фасетных отливок и построенные поверхности проходных сечений единичных межлопаточных каналов, смотри рисунок 2.22;
- Текстовый файл протокола, в котором указаны фактические значения проходных сечений для всех межлопаточных каналов соплового аппарата;
- Текстовый файл для станка с ЧПУ, содержащий информацию о смещениях по осям X, Y, Z, а также об углах поворота по осям A, B, C для разворота и позиционирования установочного приспособления.

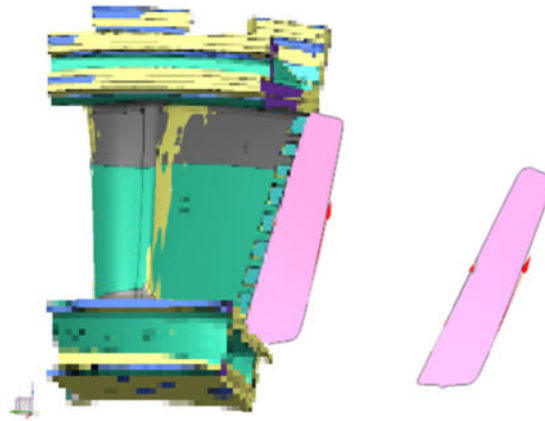


Рисунок 2.22 Поверхности проходных сечений единичных межлопаточных каналов, построенные в программе NX

3) Обработка сопловой лопатки на многоосевом шлифовальном станке с ЧПУ.

В установочном приспособлении сопловая лопатка фактически базируется по 6 точкам, а необходимое изменение угла разворота пера лопатки происходит за счёт дополнительных смещений и углов разворота установочного приспособления. Изменения положения приспособления выполняется за счёт физического доворота приспособления с помощью наклонно-поворотного стола станка с ЧПУ, а смещения по осям выполняются благодаря смещению системы координат обработки относительно её номинального положения. При этом установка и позиционирование лопатки в приспособлении выполняется по 6-ти базовым точкам, а само приспособление находится не в центре вращения паллеты и стола станка, а ближе к краю паллеты. Паллетой называется сменное универсальное приспособление-спутник для станка с ЧПУ, предназначенное для быстрой переналадки с одного приспособления на другое приспособление без потери точности установки, это позволяет однозначно устанавливать приспособление в рабочей зоне станка. Точность расположения приспособления обеспечивается за счёт применения так называемого нулевого базирования приспособления, которое обеспечивается базовой станцией и точным расположением базовых элементов на паллете. Применение паллетной системы позволяет оперативно менять приспособления на станке и существенно экономить

время на переналадку станка с ЧПУ при смене одного приспособления на другое. Основным преимуществом паллетной системы является то, что после снятия паллеты со станка, её можно заново установить на станок и при этом не потребуется выполнять настройку. Поскольку сохраняется первоначальная настройка расположения паллеты на столе станка, так как расположения приспособления остаётся неизменным.

Файл со смещениями и разворотами передаётся по локальной сети на стойку шлифовального станка с ЧПУ. Перед началом обработки установочных поверхностей сопловой лопатки загружается текстовый файл в стойку станка и после этого станок начинает учитывать дополнительные смещения и развороты приспособления. При этом управляющие программы для обработки лопатки остаются неизменными и соответствуют конструкторской геометрической модели лопатки. Фактически происходит разворот установочных поверхностей сопловой лопатки относительно литых точек и, что самое главное, относительно пера сопловой лопатки.

Оператор загружает файл на стойку станка, после чего устанавливает паллету с приспособлением на стол станка с ЧПУ, а затем закрепляет лопатку в приспособлении при этом, лопатка базируется в приспособлении по точкам к1-к6. После запуска управляющей программы, по команде стойки с ЧПУ происходит её фактический разворот лопатки на расчётный угол (γ) вместе с приспособлением. Разворот лопатки осуществляется за счёт наклонно-поворотного стола станка MFP-050.65.65, который выполняет команды стойки с ЧПУ согласно данным из файла, в котором указаны смещения и развороты приспособления. Затем выполняется корректирующее глубинное шлифование установочных поверхностей сопловой лопатки по номинальным управляющим программам.

При выполнении корректирующих действий, а именно введении дополнительного разворота сопловой лопатки относительно оси лопатки, также происходит изменение положения 6 базовых точек К1-К6, они тоже смещаются относительно номинального положения (рисунок 2.23). Поэтому при контроле

лопаток надо учитывать дополнительный доворот лопатки за счёт приспособления. Или использовать оптические и контактные методы контроля, в которых можно учесть данный разворот сопловой лопатки.

4) Физическая сборка соплового аппарата в сборочном цеху с выполнением оптического контроля фактической общей площади проходного сечения соплового аппарата выполняется с помощью оптического комплекса ATOS.

После корректирующей обработки комплекта лопаток на шлифовальном станке с ЧПУ выполняется повторная оцифровка всего комплекта лопаток.

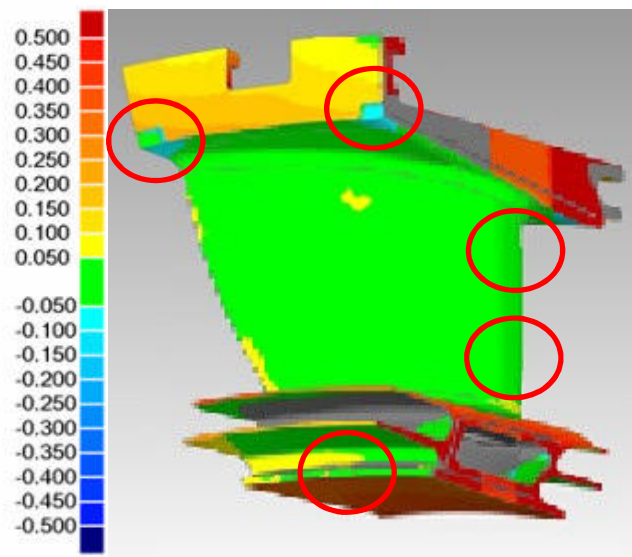


Рисунок 2.23 Результаты цифрового контроля фактического отклонения геометрии профиля пера сопловой лопатки от конструкторской геометрической модели после разворота лопатки

Вначале каждую лопатку оцифровывают отдельно и сравнивают с номинальной конструкторской моделью, это делается для проверки соответствия размеров чертежу и подтверждения соответствия геометрии сопловой лопатки. При контроле годности сопловых лопаток, кроме данных с ATOS, контролёр измеряет часть размеров с помощью ручного инструмента, такого как микрометр, штангенциркуль, калибры и шаблоны. Затем с помощью СПО выполняется виртуальная сборка соплового аппарата из обработанных лопаток и проверка соответствия общей ППС СА заданному значению.

После подтверждения ППС СА и получения протокола измерения годные сопловые лопатки передаются для сборки реального соплового аппарата в механический цех. Затем выполняется оцифровка уже собранного соплового аппарата в окончательном виде, в котором узел будет передан в сборочный цех, рисунок 2.24.

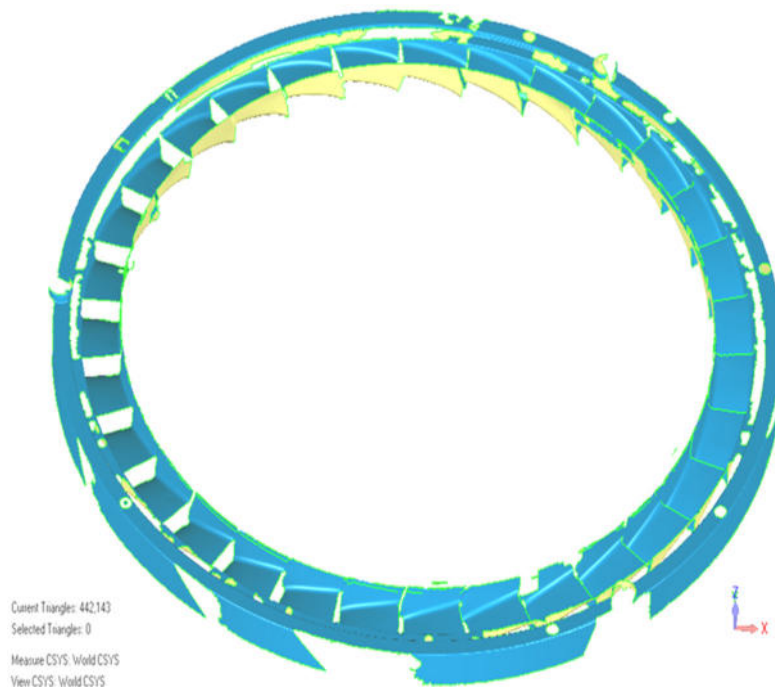


Рисунок 2.24 Собранный оцифрованный сопловой аппарат, полученный с помощью оптического комплекса ATOS.

Поскольку часть поверхностей собранного соплового аппарата невозможно оцифровать ввиду затенения части поверхностей другими лопатками и элементами узла, участвующих в расчёте ППС СА, то в файл с имеющейся оцифровкой соплового аппарата добавляют оцифровки каждой сопловой лопатки. Позиционирование единичных оцифровок лопаток выполняют по наилучшему совмещению пера и проточных поверхностей лопатки в сопловом аппарате. В результате после построения поверхности между двумя лопатками формируется реальная площадь проходного сечения межлопаточного канала с учётом фактических зазоров между клиньями рядом стоящих лопаток, кривизны геометрии пера сопловой лопатки, а также отклонения при позиционировании лопатки относительно базовых поверхностей в узле и другие погрешности,

которые образуются при сборке реального соплового аппарата. Всё эти погрешности учитываются при построении ППС единичного межлопаточного канала. Затем происходит суммирование площадей всех единичных межлопаточных каналов, в результате получается реальное значение общей ППС СА, смотри рисунок 2.25.

Данные:			Описание:			
Расчетные параметры проходного сечения						
САД-модель						
Исходные данные			Количество лопаток, представленных для расчета: лопатки 38 шт. лопатки сканированы			
Способ получения STL-файла						
Размещение stl-файлов						
Размещение prt-файлов построения						
Протокол измерений						
ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ						
Определение фактической площади (F) проходного сечения (ПС) одного межлопаточного канала, F, мм2			Фактическое значение, мм2	Погрешность 1 М фасетного тела общая E, мм	Погрешность измеренной площади, ± S, мм2	Значение по чертежу (ТУ), мм2
№ пары	Номера пар лопаток					
1	Лопатка №1	Лопатка №2	1136,37	0,06	7,73	F _{рп} =1138,62
2	Лопатка №2	Лопатка №3	1143,07	0,06	7,78	
3	Лопатка №3	Лопатка №4	1143,86	0,06	7,75	
4	Лопатка №4	Лопатка №5	1139,47	0,06	7,73	
5	Лопатка №5	Лопатка №6	1138,77	0,06	7,74	
6	Лопатка №6	Лопатка №7	1147,08	0,06	7,80	
7	Лопатка №7	Лопатка №8	1136,11	0,06	7,72	
8	Лопатка №8	Лопатка №9	1149,64	0,06	7,73	
9	Лопатка №9	Лопатка №10	1129,94	0,06	7,74	
10	Лопатка №10	Лопатка №11	1149,48	0,06	7,78	
11	Лопатка №11	Лопатка №12	1150,83	0,06	7,75	
12	Лопатка №12	Лопатка №13	1148,45	0,06	7,74	
13	Лопатка №13	Лопатка №14	1137,16	0,06	7,69	
14	Лопатка №14	Лопатка №15	1145,67	0,06	7,75	
15	Лопатка №15	Лопатка №16	1128,55	0,06	7,70	
16	Лопатка №16	Лопатка №17	1144,45	0,06	7,74	
17	Лопатка №17	Лопатка №18	1135,90	0,06	7,72	
18	Лопатка №18	Лопатка №19	1136,51	0,06	7,73	
19	Лопатка №19	Лопатка №20	1138,35	0,06	7,74	
20	Лопатка №20	Лопатка №21	1143,54	0,06	7,73	
21	Лопатка №21	Лопатка №22	1145,18	0,06	7,76	
22	Лопатка №22	Лопатка №23	1133,78	0,06	7,73	
23	Лопатка №23	Лопатка №24	1138,84	0,06	7,74	
24	Лопатка №24	Лопатка №25	1145,18	0,06	7,75	
25	Лопатка №25	Лопатка №26	1133,46	0,06	7,76	
26	Лопатка №26	Лопатка №27	1145,62	0,06	7,75	
27	Лопатка №27	Лопатка №28	1136,94	0,06	7,73	
28	Лопатка №28	Лопатка №29	1132,31	0,06	7,70	
29	Лопатка №29	Лопатка №30	1133,64	0,06	7,74	
30	Лопатка №30	Лопатка №31	1145,60	0,06	7,76	
31	Лопатка №31	Лопатка №32	1144,70	0,06	7,74	
32	Лопатка №32	Лопатка №33	1141,36	0,06	7,74	
33	Лопатка №33	Лопатка №34	1147,31	0,06	7,71	
34	Лопатка №34	Лопатка №35	1153,41	0,06	7,81	
35	Лопатка №35	Лопатка №36	1140,69	0,06	7,75	
36	Лопатка №36	Лопатка №37	1132,18	0,06	7,71	
37	Лопатка №37	Лопатка №38	1142,65	0,06	7,73	
38	Лопатка №38	Лопатка №1	1147,58	0,06	7,78	
			Фактическое значение, см2	Погрешность общая усредненная, мм	Погрешность измеренной площади усредненная, см2	Значение по чертежу (ТУ), мм2
Количество лопаток в сопловом аппарате, шт.						38 шт.
Усредненная площадь одного межлопаточного канала, см2			11,32	0,06	±0,06	F _{рп} =11,38см2
Площадь проходного сечения соплового аппарата, см2			433,64		±2,03	F _{рп} =432,67 F _{min} =430,51...434,83см2
Отклонение от расчетного значения, %			0,380			
Относительная погрешность, %			0,656			

Рисунок 2.25 Протокол с данными расчёта ППС СА как единичных каналов, так и общая ППС СА

По результатам контроля собранного соплового аппарата обеспечивается один из важнейших параметров соплового аппарата, такой как общая площадь проходного сечения соплового аппарата, причём с первого раза. А благодаря

автоматизации процесса контроля общей площади проходного сечения соплового аппарата в сборочном и механических цехах результаты замеров имеют близкие значения, которые находятся в пределах допуска на общую площадь соплового аппарата.

Выводы по главе 2

1. Выдвинута гипотеза, о том, что любой полученный после литья комплект сопловых лопаток можно заранее проверить на соответствие общей площади проходного сечения соплового аппарата. Это позволит нам с высокой точностью прогнозировать общую площадь проходного сечения соплового аппарата после обработки лопаток на шлифовальном станке с ЧПУ и их сборки в сопловой аппарат. Если ППС СА окажется меньше требуемого значения, можно выполнить корректирующий разворот всех лопаток на расчётный угол. Это позволит добавить недостающую площадь к общему её значению и обеспечить требуемую общую площадь проходного сечения соплового аппарата в заданном допуске в сборочном цеху и с первого раза.

2. Для проверки регрессивной зависимости и оценки эффективности работы нового технологического процесса оказывать влияние на изменение общей ППС СА после корректирующей обработки лопаток на многоосевом шлифовальном станке с ЧПУ. Для этого необходимо провести экспериментальные исследования разработанной технологии обработки сопловых лопаток и сборку из данных лопаток соплового аппарата в реальных производственных условиях механического и сборочного цеха предприятия АО «ОДК-Авиадвигатель».

3. Для выполнения оперативного расчёта необходимого угла разворота для комплекта сопловых лопаток и минимизации вероятности ошибок в расчётах, а также облегчения работы технологов при подготовке производства к обработке нового комплекта сопловых лопаток, разработано специальное программное обеспечение. Запланированы испытания и отладка этого программного обеспечения.

4. Подготовительные работы для проведения экспериментальных работ по корректирующей обработке комплекта сопловых лопаток. Целью является проверка гипотезы, заложенной в новом технологическом процессе. Для этого необходимо разработать методику проведения экспериментальных работ, которая будет использоваться для обработки сопловых лопаток. Затем по этой методике будет выполнена экспериментальная обработка одного комплекта сопловых лопаток на многоосевом шлифовальном станке с ЧПУ. Для контроля результата обработки сопловых лопаток и проверки, общей ППС СА после сборки, будет использоваться оптический комплекс ATOS.

Глава 3. Разработка методического обеспечения экспериментального исследования новой технологии повышения производительности и точности изготовления сопловых лопаток и сборки сопловых аппаратов

3.1 Выбор и характеристика оборудования для проведения исследования

Для проведения исследований выбран пятиосевой профилешлифовальный станок с ЧПУ модели MFP-050.65.65 фирмы «Mägerle», страна-изготовитель Швейцария, оснащённый наклонно-поворотным столом (рисунок 3.3) [68]. Данный стол позволяет поворачивать сопловую лопатку вместе с приспособлением на необходимый угол γ без необходимости пересчёта управляющих программ. Благодаря такой компоновке станка (рисунок 3.2) и системе числового программного управления появляется возможность использовать внешний файл с данными о смещениях и разворотах лопатки. Ключевыми преимуществами данного станка является наличие наклонно-поворотного стола, системы непрерывной правки шлифовального круга, инструментального магазина с автоматической сменой инструмента по команде управляющей программы и высоконапорная подача смазочно-охлаждающей жидкости в зону обработки (рисунок 3.1).

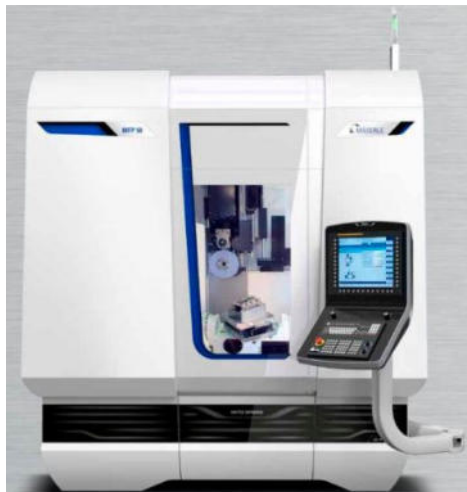


Рисунок 3.1 Внешний вид пятиосевого профилешлифовального станка MFP-050.65.65 фирмы «Mägerle»

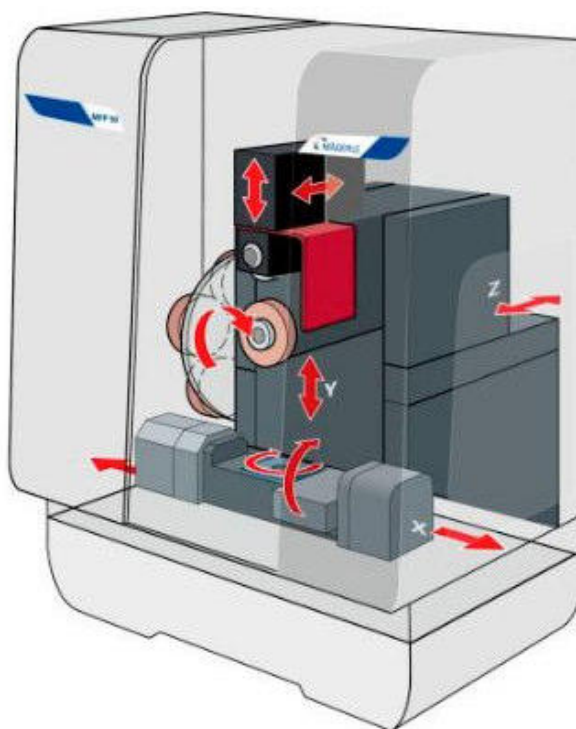


Рисунок 3.2 Компоновка станка модели MFP-50.65.65 и его кинематическая схема



Рисунок 3.3 Наклонно-поворотный стол фирмы «Fibro» для шлифовального станка модели MFP-50.65.65 фирмы «Magerle»

Станок обладает 2-х осевой системой управления форсункой, что позволяет управлять положением форсунки в зависимости от фактического диаметра шлифовального круга (рисунок 3.4). Это позволяет обеспечивать оптимальную подачу смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания при уменьшении диаметра шлифовального круга в процессе обработки лопатки.



Рисунок 3.4 Процесс обработки цилиндрической поверхности детали

Система ЧПУ станка в автоматическом режиме учитывает уменьшение фактического диаметра шлифовального круга, увеличивает обороты шлифовального круга для обеспечения постоянной скорости шлифования, что позволяет обрабатывать детали с постоянными режимами резания, поддерживая высокую производительность и точность обработки лопатки.

Станок оснащён вместительным инструментальным магазином (рисунок 3.5), который позволяет разместить 12 шлифовальных кругов диаметром 300 мм или 24 осевых инструмента, таких как фрезы, сверла и расточные резцы.

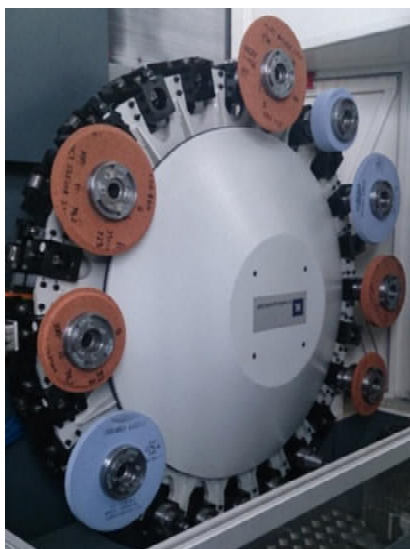


Рисунок 3.5 Инструментальный магазин шлифовального станка вмещает 12 позиций шлифовальных кругов диаметром 300 мм или 24 позиции для осевого инструмента

Данный магазин позволяет установить весь необходимый инструмент для обработки сопловой лопатки по всем установкам.

Наличие устройства непрерывной правки (рисунок 3.6) позволяет мгновенно править шлифовальный круг, тем самым обеспечивается постоянство условий резания и самозатачивание круга во время обработки. Это позволяет эффективно обрабатывать различные жаропрочные сплавы, снимая за один проход около 1-2 мм материала, что позволяет снимать весь припуск за 3-6 проходов.

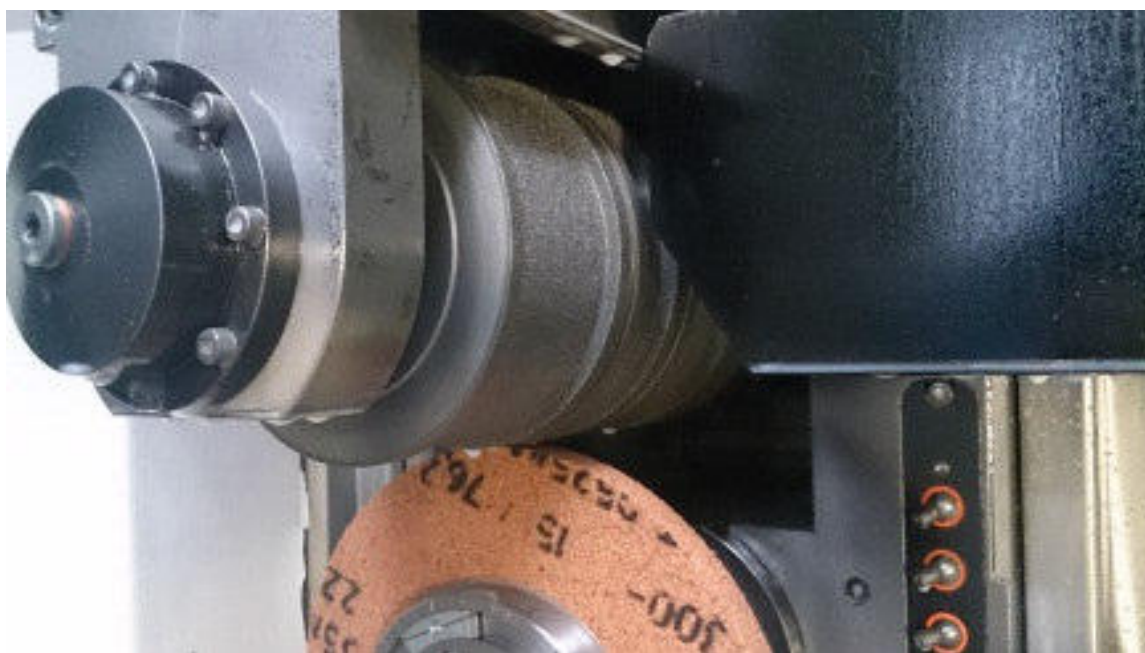


Рисунок 3.6 Устройство непрерывной правки шлифовального круга

Станок обладает горизонтально расположенным шпинделем на 50 кВт (рисунок 3.7), что позволяет при необходимости снимать припуск от 0,1 до 10 мм за один проход. Наклонно-поворотный стол оснащён базовой станцией фирмы «Erowa», что позволяет быстро заменять паллету с установленным на нем специальным приспособлением для закрепления лопатки (рисунок 3.8) для обработки моторных деталей, например, сопловых лопаток. За счёт данной компоновки, наклонно-поворотного стола и системы ЧПУ станок может обрабатывать радиальные поверхности на лопатках, обеспечивая оптимальные режимы шлифования и хорошее качество обработанных поверхностей лопатки.

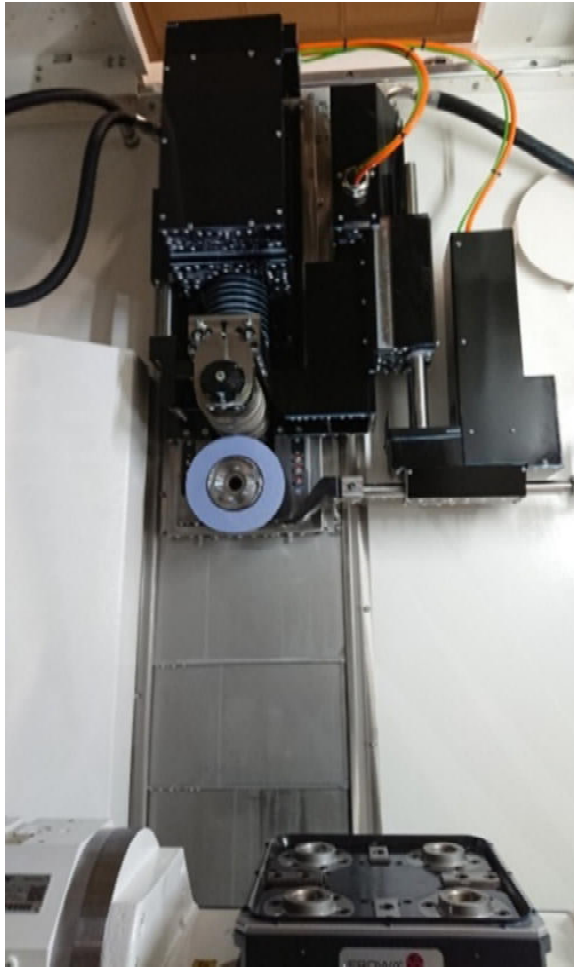


Рисунок 3.7 Наклонно-поворотный стол с базовой станцией для установки сменных паллет с приспособлением

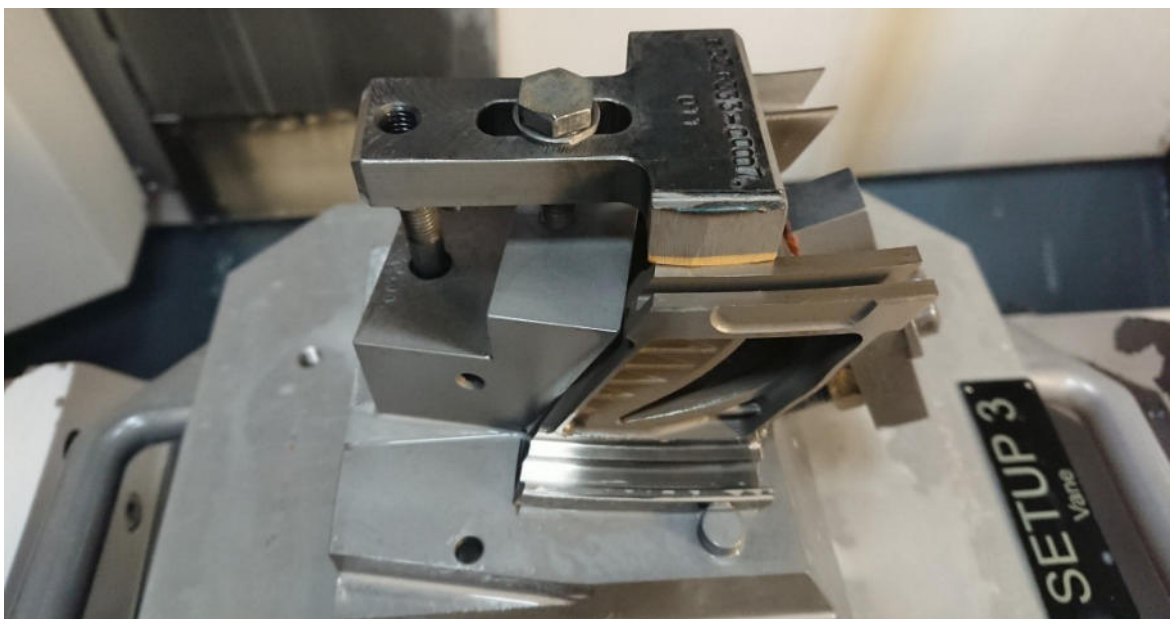


Рисунок 3.8 Приспособление для обработки сопловой лопатки, установленной на сменной паллете

В стойке данного станка установлена система числового программного управления Sinumerik 840sl. Она предназначена для управления рабочими органами пятиосевого профилешлифовального станка с ЧПУ модели MFP-050.65.65 фирмы «Mägerle». Одной из особенностей данной стойки является возможность использования внешнего файла смещений и поворотов (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 Стойка станка с ЧПУ шлифовального станка MFP-50.65.65

Данный файл содержит в себе три линейных смещения и три угловых поворота (рисунок 3.10), что позволяет индивидуально смещать обработку под каждую деталь без пересчёта управляющих программ. Этот файл был получен в стороннем ПО, а именно в специальном программном обеспечении, разработанном для расчёта оптимального угла разворота сопловых лопаток с целью обеспечения общей площади проходного сечения соплового аппарата. Затем с помощью внутренней сети предприятия данный файл передаётся в стойку станка с ЧПУ. Благодаря данному файлу происходит дополнительный разворот приспособления вместе с лопаткой, который позволяет изменить положение

установочных баз относительно пера лопатки.

```
CHANDATA (1)
GD5_CMM_IDENT= "000-0000"
GD5_CMM_PARTNO= " A00_00_0_0"
GD5_CMM_X_OFFS= -0.783110
GD5_CMM_Y_OFFS= 1.412235
GD5_CMM_Z_OFFS= -0.029716
GD5_CMM_A_OFFS= 0.000635
GD5_CMM_B_OFFS= 0.013866
GD5_CMM_C_OFFS= 0.680035
M17
```

Рисунок 3.10 Пример файла который осуществляет разворот лопатки на
профилешлифовальном станке с ЧПУ

Таким образом, после сборки сопловых лопаток в реальный сопловой аппарат по скорректированным установочным поверхностям, положение лопатки изменяется, и, как следствие, происходит доворот пера лопатки вокруг своей оси.

В результате этого разворота увеличивается площадь проходного сечения каждого межлопаточного канала, а значит, и общая площадь проходного сечения соплового аппарата.

3.2 Выбор режущих инструментов и режимов резания для проведения исследования

Для глубинного шлифования базовых поверхностей сопловой лопатки выбраны отечественные высокопористые керамические шлифовальные круги фирмы ООО «Волгашлиф Плюс» 1 300x30x76,2 25A F60 G14V, 35 м/с (рисунок 3.11) [65] на основе предварительных экспериментов и опыта предприятий. Станок оснащён инструментальным магазином с возможностью автоматической сменой шлифовальных кругов во время обработки, что позволяет обрабатывать различные поверхности сопловой лопатки за один установ.

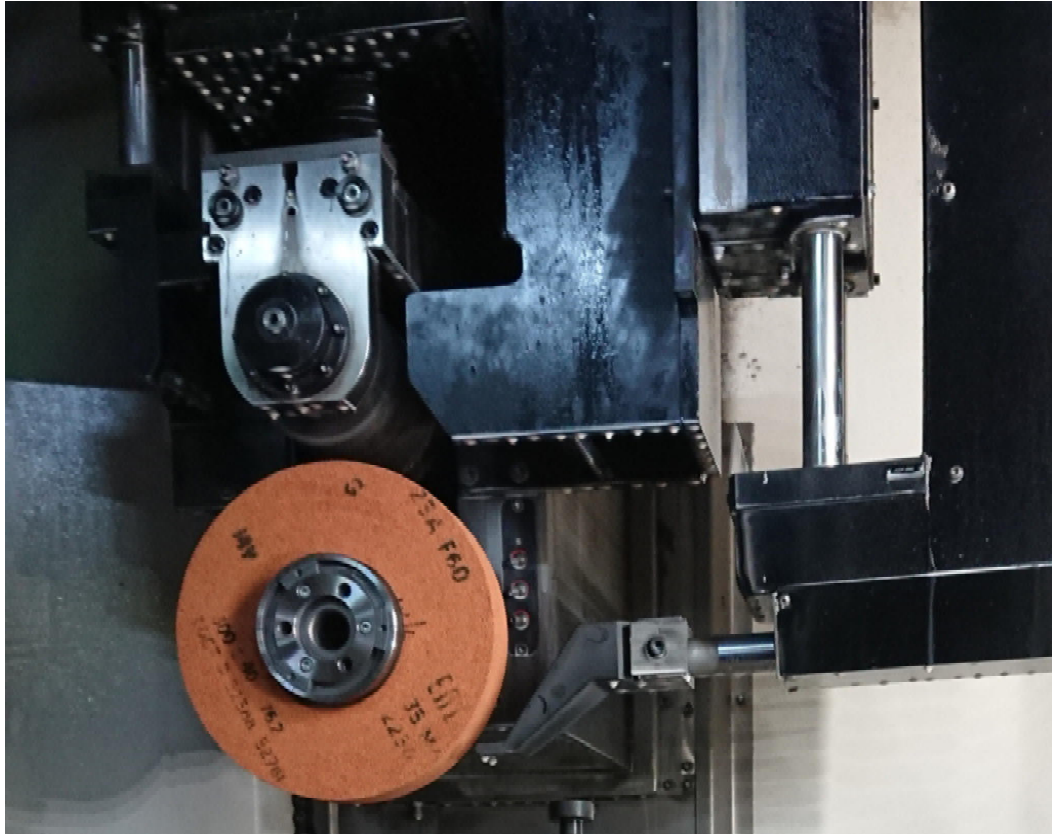


Рисунок 3.11 Шлифовальный круг на шпинделе станка и правка алмазным роликом для непрерывной правки

Определены рациональные режимы резания, обеспечивающие производительное безприжоговое шлифование сопловых лопаток [67] с обеспечением требуемой шероховатости поверхности $Ra=1,25$ мкм. Режимы резания:

- скорость круга $V=20$ м/с;
- подача $S=150-200$ мм/мин;
- непрерывная правка 0,8 мкм/об;
- подачей СОЖ 6-8% Blaser 4000CF под давлением 6 бар [65].

Правка шлифовальных кругов осуществляется непрерывно с помощью плоских и профильных алмазных роликов.

Обработка поверхностей сопловой лопатки выполнялась на данных режимах при величине припуска от 1 до 2 мм. Весь припуск на обрабатываемой поверхности снимается за 5 проходов с уменьшением глубины резания от 0,6 до

0,02 мм в таблице 3.1 [65].

Таблица 3.1 Режимы резания и припуска для обработки поверхностей сопловой лопатки

№ прохода	Глубина t , мм	Подача S , мм/мин.	Скорость V , м/с	Непрерывная правка роликом мкм/об	Соотношение скоростей (шлифовальных круг/ролик)
1	1	150	20	0,8	0,8
2	0,5	150	20	0,8	0,8
3	0,4	150	20	0,6	0,8
4	0,08	200	20	0,4	0,8
5	0,02	200	20	0	0

Выбраны для обработки отечественные высокопористые керамические шлифовальные круги фирмы ООО «Волгашлиф Плюс» с маркировкой 1 300x30x76,2 25A F60 G14V.

где 1 – прямой профиль (ПП);

300x30x76,2 – размеры ($D \times H \times d$), мм;

25A – шлифматериал (электрокорунд белый);

F60 – зернистость по FEPA (средняя), средний размер - 260 мкм;

G – твёрдость (весьма мягкая);

14 – структура (высокопористая);

V – связка (керамическая).

3.3 Выбор деталей для проведения исследования

Для проведения исследования выбран комплект сопловых лопаток 2-й ступени ТВД в количестве 38 штук (рисунок 3.12), полученный после литья. Контроль геометрии лопатки выполняли с помощью системы ATOS III с точностью измерения $\pm 0,02$ мм. Для отслеживания изменения общей площади проходного сечения соплового аппарата выполнена оцифровка комплекта

сопловых лопаток как до, так и после обработки на многоосевом шлифовальном станке с ЧПУ, а также после реальной сборки соплового аппарата (рисунок 3.13).

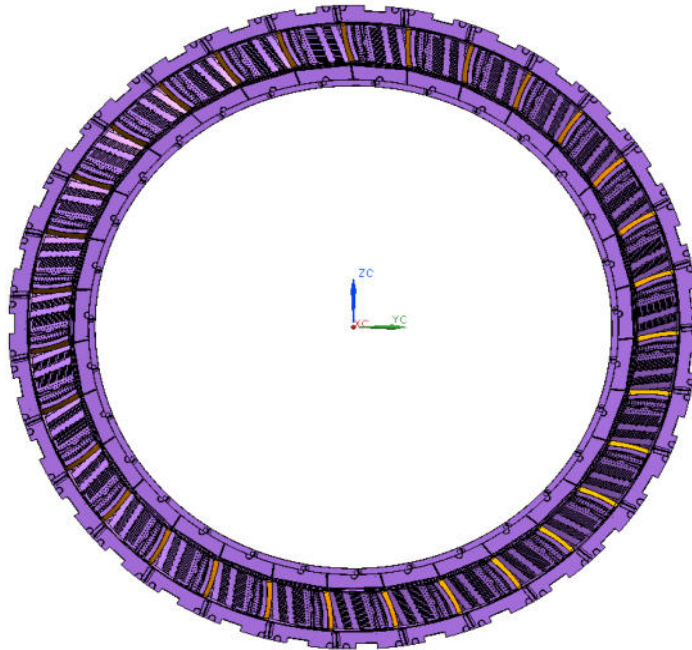


Рисунок 3.12 Геометрическая модель соплового аппарата в сборе



Рисунок 3.13 Внешний вид реального собранного соплового аппарата

3.4 Выбор измерительного прибора для проведения оптического контроля и анализа результатов исследования

Для контроля геометрии сопловых лопаток, полученных после литья, и лопаток, обработанных на многоосевом шлифовальном станке с ЧПУ, а также для контроля реального собранного соплового аппарата выбрана оптическая координатно-измерительная топометрическая система ATOS (рисунок 3.14, 3.15, 3.16) для контроля геометрических параметров поверхностей сложной формы [115].

Для контроля геометрии сопловой лопатки сначала выполняется оцифровка каждой лопатки в отдельности с помощью оптической головы ATOS (рисунок 3.16).

По результатам контроля ATOS формируется файл, содержащий геометрическую и оцифрованную модель лопатки (рисунок 3.17).

После сборки реального соплового аппарата также выполняется его полная оцифровка с целью проверить фактическую площадь проходного сечения соплового аппарата (рисунок 3.18).



Рисунок 3.14 Внешний вид оптической измерительной системы ATOS [114]

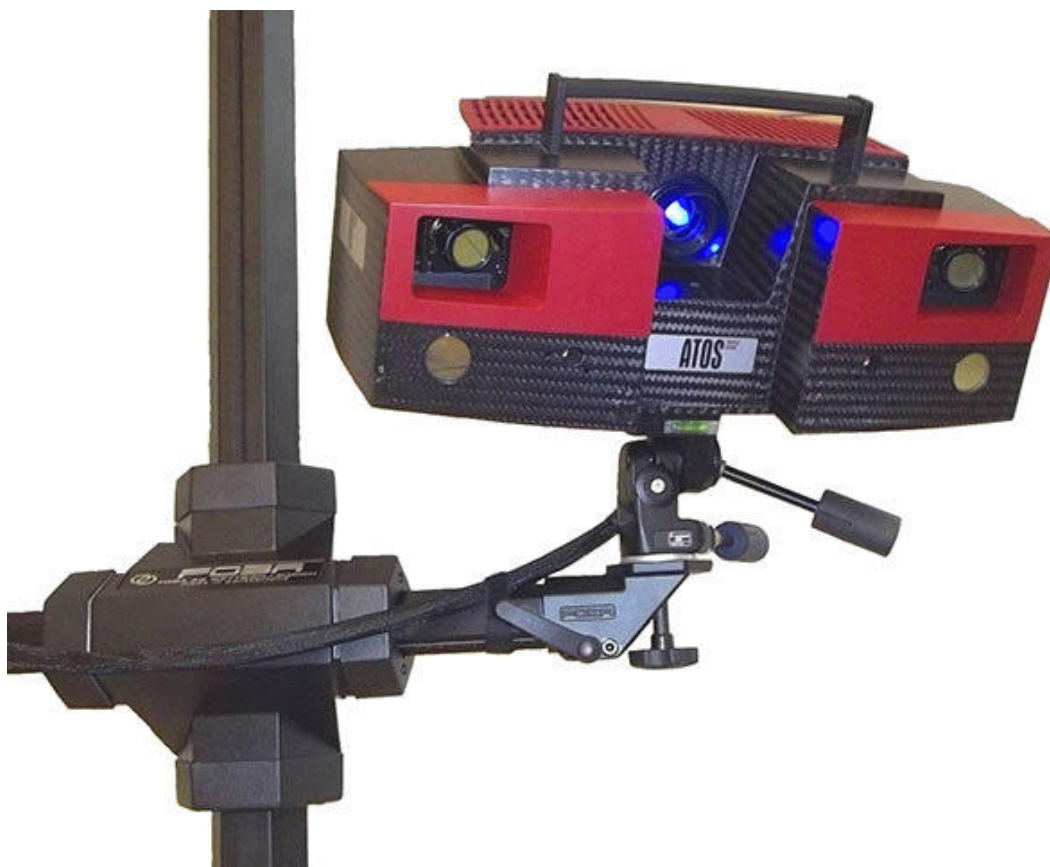


Рисунок 3.15 Внешний вид измерительной головы системы ATOS [114]

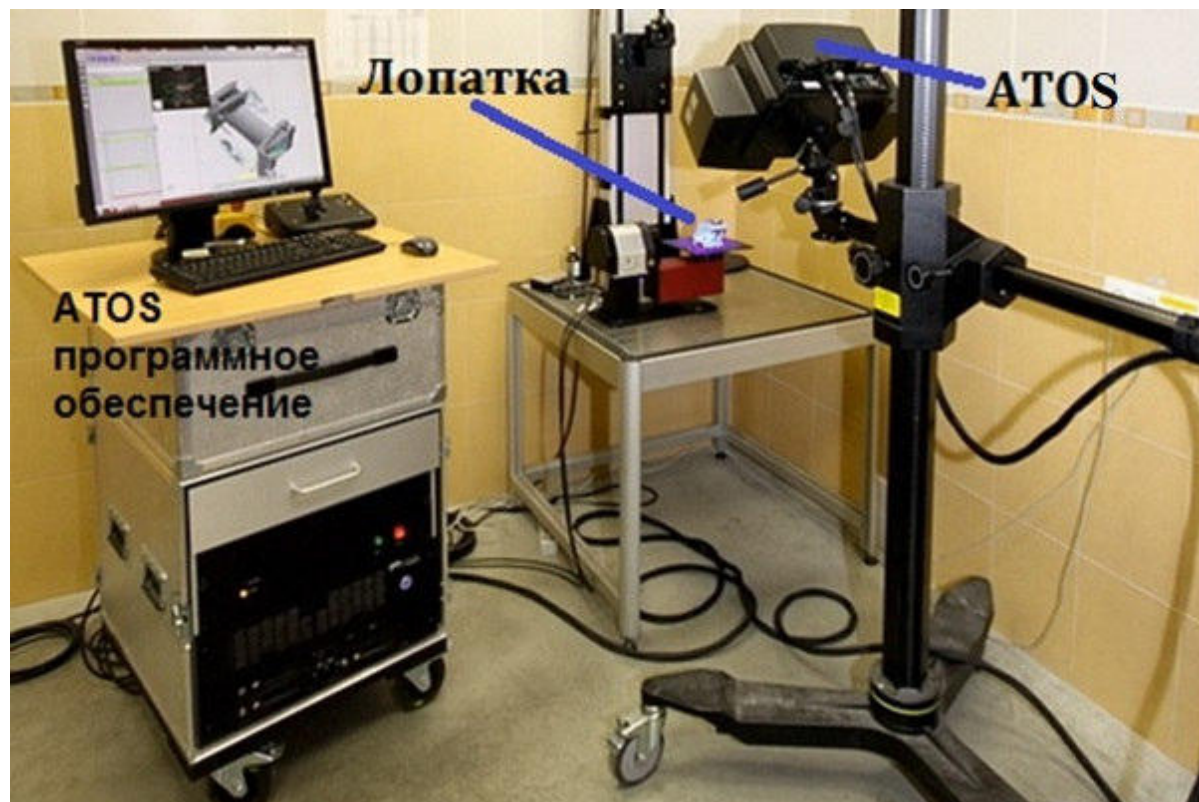


Рисунок 3.16 Процесс оцифровки сопловой лопатки с помощью ATOS

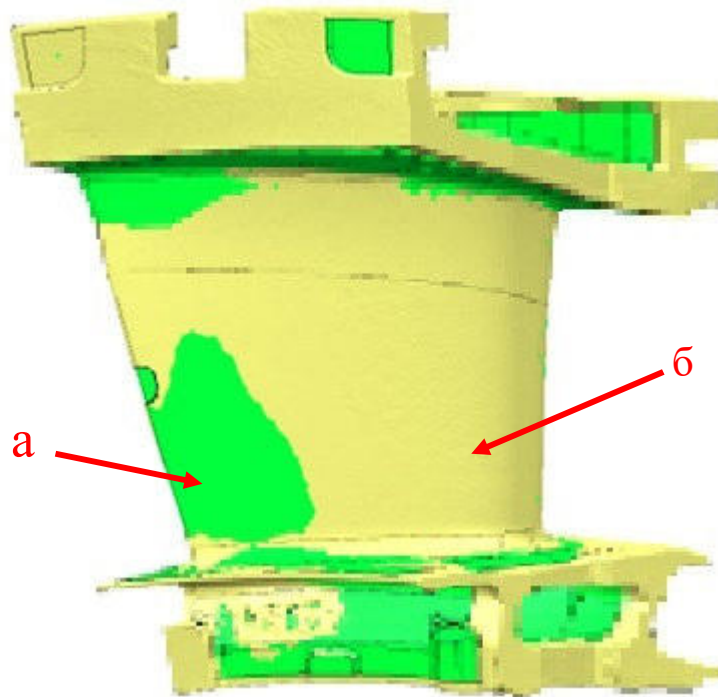


Рисунок 3.17 Оцифрованная модель лопатки, совмещённая с конструкторской моделью: а – зелёным цветом окрашена геометрическая модель лопатки, б – светло-жёлтым цветом окрашена оцифрованная модель лопатки, полученная с помощью ATOS

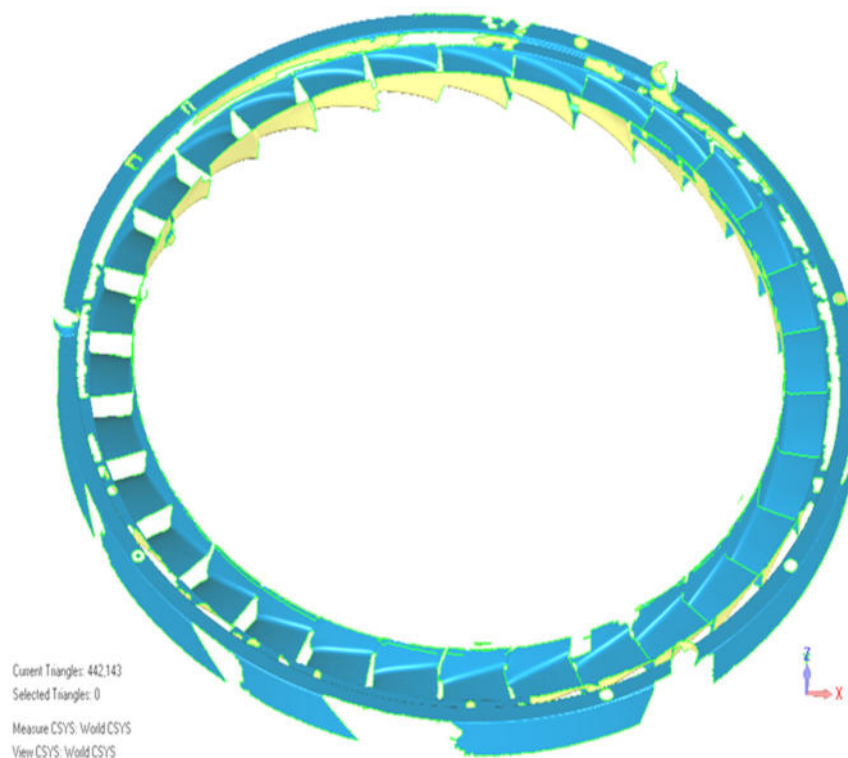


Рисунок 3.18 Оцифрованная модель собранного соплового аппарата

Выводы по главе 3

1. Применение современного многоосевого шлифовального оборудования с числовым программным обеспечением для обработки деталей турбины, таких как сопловые лопатки, изготовленные из труднообрабатываемых и жаропрочных материалов, позволяет повысить производительность обработки, точность и обеспечить требуемую шероховатость обработанных поверхностей лопаток за счёт применения метода глубинного шлифования, высокопористых шлифовальных кругов, непрерывной правки шлифовального круга и подачи смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания под большим давлением и в большом объёме.

2. Современные шлифовальные станки с ЧПУ оснащены наклонно-поворотным столом, что позволяет увеличить число обрабатываемых поверхностей за одну установку. Это способствует повышению точности изготовления взаимно расположенных поверхностей сопловой лопатки. Данный шлифовальный станок с ЧПУ оснащён инструментальным магазином на 24 позиций, что позволяет быстро менять круги во время шлифовки и обрабатывать различные поверхности лопатки за одну установку, в том числе и радиальные поверхности. Ёмкости магазина достаточно для размещения всего необходимого инструмента для обработки сопловой лопатки по всем поверхностям и операциям.

3. Применение многоосевого шлифовального станка с ЧПУ позволило реализовать обработку радиальных поверхностей сопловой лопатки высокопористыми кругами, а также обрабатывать канавки кругами из кубического нитрида бора. А наличие эффективного охлаждения в зоне резания позволяет обрабатывать радиальные поверхности и канавки на высокопроизводительных режимах обработки без риска образования трещин и прижогов на обработанных поверхностях.

4. Современные бесконтактные оптические методы контроля позволяют повысить производительность процесса контроля сложной геометрии такой как у рабочих и сопловых лопаток. Это позволяет сократить время контроля лопаток,

повысить точность и стабильность процесса измерения. Данные оптические системы позволяют автоматизировать процесс контроля сложных деталей, что приводит к снижению влияния человеческого фактора на результаты контроля.

5. Оптические методы контроля позволяют получать протоколы с результатами измерений в 2-3 раза быстрее и с большей детализацией, чем при контроле с использованием координатно-измерительной машины или измерительной руки.

6. Благодаря оптическому измерительному комплексу ATOS появилась возможность контролировать реальную площадь проходного сечения соплового аппарата и обеспечивать стабильный результат контроля, что позволило обеспечивать сходимость результатов контроля в механическом и сборочном цехах.

7. Разработанная технология позволяет выполнить обработку одного единственного отлитого комплекта сопловых лопаток и при этом гарантированно обеспечивается общая площадь проходного сечения соплового аппарата после сборки в сборочном цеху и с первого раза. Благодаря этой технологии отпадает необходимость заменять лопатки из одного комплекта на другие лопатки, полученные из другой партии литья, что всегда приходилось делать при серийной технологии обработки. Серийная технология обязывает механический цех иметь достаточный запас обработанных лопаток на складе для оперативной установки в сопловой аппарат при сборке.

Глава 4. Анализ результатов экспериментальных исследований эффективности применения новой технологии

4.1 Сопоставление графиков оценки эффективности новой технологии и разработки технологических рекомендаций по внедрению в производство

Представлен анализ результатов экспериментальных исследований эффективности применения новой технологии с целью повышения производительности, точности изготовления сопловых лопаток и сборки сопловых аппаратов турбин.

Согласно, разработанной методике и алгоритму работ выполнена обработка комплекта из 38 сопловых лопаток. Результаты расчётов были выполнены с помощью специального программного обеспечения и измерений на оптической бесконтактном измерительном комплексе ATOS, которые представлены в таблицах 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 и рисунках 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5.

Получены результаты совмещения оцифрованных моделей отливок лопатки с конструкторской геометрической моделью лопатки. Совмещение оцифровки и геометрической модели выполнялось по шести базовым точкам К1-К6, а затем с помощью специального программного обеспечения выполнена виртуальная оценка межлопаточной площади проходного сечения единичных каналов и рассчитана общая площадь проходного сечения для соплового аппарата. Результаты расчёта представлены в таблице 4.1 и на рисунке 4.1.

Таблица 4.1 Виртуальная оценка ППС СА межлопаточных каналов в СПО, полученная по результатам оптического контроля литых лопаток (без разворота)

Единичный межлопа. канал для лопаток, полученных после литья	Площадь межлопаточного канала S_1 , мм ² после литья	Отклонение от номинального значения 1138,62 мм ²	Индивидуальный угол разворота лопаток γ , град.
Меж. канал 1	1138,62	-2,11	0,23

Продолжение таблицы 4.1

Меж. канал 2	1125,41	-13,21	1
Меж. канал 3	1136,14	-2,48	0,26
Меж. канал 4	1123,38	-15,24	1
Меж. канал 5	1131,24	-7,38	0,67
Меж. канал 6	1138,34	-0,28	0,15
Меж. канал 7	1125,40	-13,22	1
Меж. канал 8	1139,66	1,04	0,18
Меж. канал 9	1126,51	-12,11	0,95
Меж. канал 10	1142,47	3,85	0,43
Меж. канал 11	1144,24	5,62	0,60
Меж. канал 12	1138,32	-0,30	0,16
Меж. канал 13	1122,83	-15,79	1
Меж. канал 14	1135,61	-3,01	0,32
Меж. канал 15	1124,73	-13,89	1
...	...	...	...
Меж. канал 37	1137,35	-1,27	0,16
Меж. канал 38	1133,58	-5,04	0,45
Итого:	$S_1 \text{ среднее} = 1132,64$	$\Delta S_1 \text{ среднее} = -5,98$	$\gamma \text{ среднее значение} = 0,68$

Из графика на рисунке 4.1 видно, что линия тренда S_1 находится ниже минимального значения допуска, это графическое отображение среднего значения для всех точек графика. Это значит, что после сборки данных сопловых лопаток в сопловой аппарат не обеспечится суммарная площадь проходного сечения соплового аппарата и потребуется выполнить доработку или переборку соплового аппарата с заменой или перестановкой сопловых лопаток.

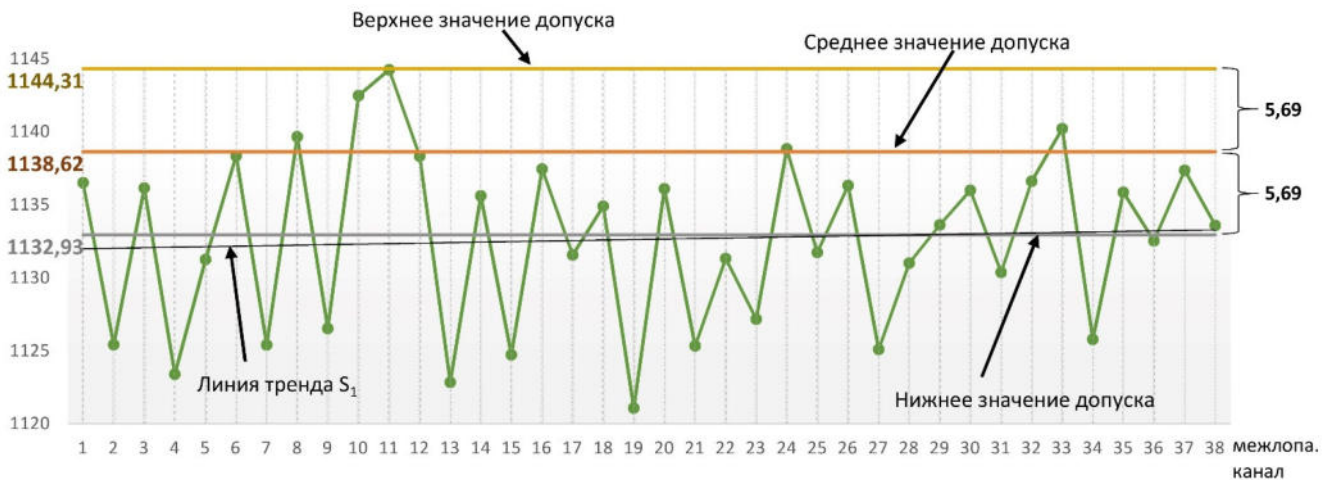


Рисунок 4.1 Распределение площади проходного сечения единичного межлопаточного канала литых лопаток без разворота одного комплекта лопаток (один сопловой аппарат)

В результате анализа графика на рисунке 4.1 и таблицы 4.1 можно сделать следующие выводы:

- 17 пар из 38 лопаток соответствует заданному допуску на ППС для единичного межлопаточного канала ($1138,62 \pm 5,69 \text{ мм}^2$);
- 20 пар лопаток находится ниже заданного значения допуска ППС для единичного межлопаточного канала ($1132,93 \text{ мм}^2$);
- 1 пара лопаток находится выше заданного значения допуска ППС для единичного межлопаточного канала ($1144,31 \text{ мм}^2$);
- Общая площадь проходного сечения соплового аппарата равна $43040,40 \text{ мм}^2$ и не соответствует требуемому значению ($43267,6 \pm 216 \text{ мм}^2$);
- Площадь проходного сечения единичного межлопаточного канала S_1 для пары лопаток находится в диапазоне значений от $1121,06$ до $1144,24 \text{ мм}^2$;
- Среднее значение площади проходного сечения единичного межлопаточного канала $S_1 = 1132,64 \text{ мм}^2$, что на $0,29 \text{ мм}^2$ меньше требуемого значения $1132,93 \text{ мм}^2$, которое указано в конструкторской документации (в чертеже указано значение $1138,62 \pm 5,69 \text{ мм}^2$);

– Среднее значение отклонения площади межлопаточного канала ΔS_1 составляет 5,98 мм², что больше значения допуска $\pm 5,69$ мм² от заданной величины 1138,62 мм²;

– Рассчитанный в СПО индивидуальный угол разворота для каждой сопловой лопатки (γ) варьировался в диапазоне от 0,15 до 1 град. Для всего комплекта лопаток принято усреднённое значение угла разворота $\gamma = 0,68$ град.

Программное обеспечение позволяет рассчитывать индивидуальный угол разворота для каждой сопловой лопатки, что обеспечивает оптимальный угол разворота лопатки и равные значения межлопаточных каналов для всего комплекта. Однако решение использовать индивидуальный угол требует наличия оперативного контроля обработанных поверхностей лопатки рядом со станком с ЧПУ. Одним из таких средств контроля может служить координатно-измерительная машина, которая должна располагаться рядом со шлифовальным станком с ЧПУ. Эта координатно-измерительная машина сможет оперативно измерять установочные поверхности лопатки с учётом индивидуального угла разворота каждой лопатки. В настоящее время рядом со шлифовальным станком с ЧПУ отсутствует КИМ, что не позволяет выполнять оперативный контроль фактических размеров, полученных после обработки на станке, для разных углов разворота лопатки. Если использовать традиционные контрольные приспособления, то потребуется изготовить 38 приспособлений для контроля каждого угла. А поскольку эти углы могут изменяться от комплекта к комплекту, то каждый раз нужно будет дополнительно изготавливать контрольные приспособления для новых углов разворота лопатки. Поэтому в данном технологическом процессе принято решение использовать средний угол разворота для всех лопаток в комплекте. Это позволяет использовать одно контрольное приспособление для проверки угла разворота лопатки и корректности изготовления базовых поверхностей относительно литых баз, а именно от точек К1-К6.

После расчёта ППС соплового аппарата литых лопаток без угла разворота, чаще всего общая ППС СА не соответствует и находится ниже требуемого значения. Тогда необходимо выполнить повторный расчёт в СПО с расчётом необходимого угла разворота для всего комплекта лопаток. Расчёт выполняется итерационно при каждом расчёте значение суммарной ППС СА приближается к заданному значению. Расчётный угол разворота лопаток должен обеспечивать попадание общей площади проходного сечения соплового аппарата в середину поля допуска, а не на нижнюю или верхнюю границу поля допуска, так как при установке лопатки в приспособление, при обработке, при контроле лопатки появляются свои погрешности, в результате чего теоретически рассчитанное значение площади проходного сечения индивидуального межлопаточного окна может меняться как в большую, так и в меньшую сторону.

Результаты виртуальной оценки ППС СА после виртуального разворота всего комплекта сопловых лопаток на расчётный угол 0,68 град. представлены в таблице 4.2 и на графике на рисунке 4.2.

Таблица 4.2 Виртуальная оценка ППС СА межлопаточного канала в специальном программном обеспечении, площадь получена за счёт виртуального разворота лопаток на средний расчётный угол для всего комплекта

Единичный межлопаточный канал для лопаток с углом разворота 0,68 град.	Виртуальная площадь межлопаточного канала S_2 , мм ²	Отклонение от номинального значения 1138,62 мм ²	Индивидуальный угол разворота лопатки γ , град.
Меж. канал 1	1138,51	-0,11	0,68
Меж. канал 2	1137,41	-1,21	0,68
Меж. канал 3	1142,14	3,52	0,68
Меж. канал 4	1143,38	4,76	0,68
Меж. канал 5	1137,24	-1,38	0,68
Меж. канал 6	1142,34	3,72	0,68
Меж. канал 7	1135,40	-3,22	0,68

Продолжение таблицы 4.2

Меж. канал 8	1149,66	11,04	0,68
Меж. канал 9	1128,51	-10,11	0,68
Меж. канал 10	1142,47	3,85	0,68
Меж. канал 11	1154,24	15,62	0,68
Меж. канал 12	1143,32	4,70	0,68
Меж. канал 13	1140,83	2,21	0,68
Меж. канал 14	1145,61	6,99	0,68
Меж. канал 15	1126,73	-11,89	0,68
...	...	...	...
Меж. канал 37	1144,35	5,73	0,68
Меж. канал 38	1142,58	3,96	0,68
Итого:	S_2 среднее = 1139,80	ΔS_2 среднее = 1,18	γ среднее значение. = 0,68

На рисунке 4.2 представлен график распределения единичных межлопаточных каналов для комплекта лопаток, виртуально развёрнутых на средний угол, равный 0,68 град.

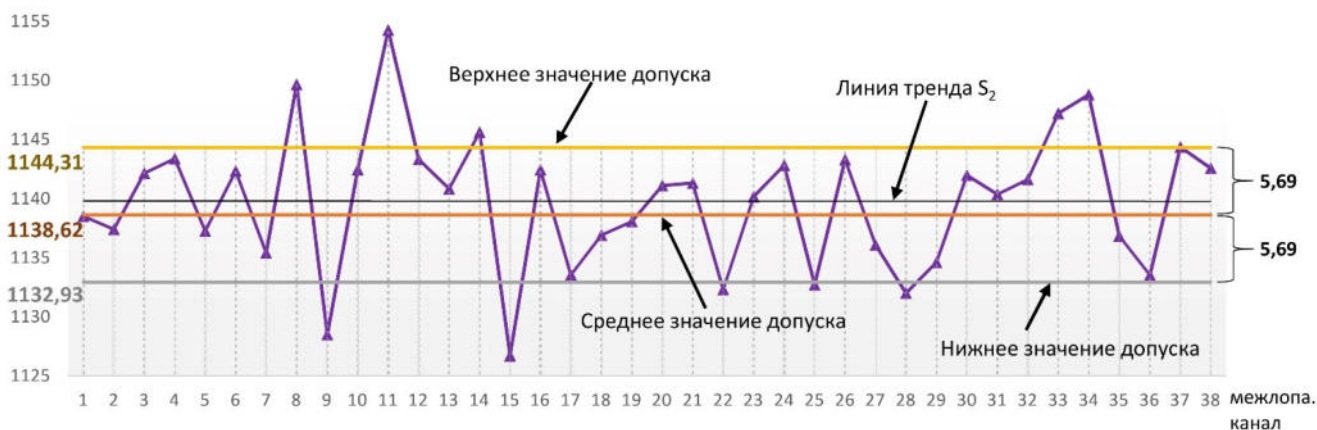


Рисунок 4.2 Распределение площади проходного сечения единичного межлопаточного канала виртуально развёрнутых сопловых лопаток одного комплекта лопаток

В результате анализа графика на рисунке 4.2 и таблицы 4.2 можно сделать следующие выводы:

- 22 пар из 38 лопаток соответствует заданному допуску на ППС для единичного межлопаточного канала ($1138,62 \pm 5,69 \text{ мм}^2$);
- 7 пар лопаток находится ниже заданного значения допуска ППС для единичного межлопаточного канала ($1132,93 \text{ мм}^2$);
- 9 пара лопаток находится выше заданного значения допуска ППС для единичного межлопаточного канала ($1144,31 \text{ мм}^2$);
- Площадь проходного сечения единичного межлопаточного канала S_2 для пары лопаток находится в диапазоне значений от 1126,73 до 1154,24 мм^2 ;
- Среднее значение площади единичного межлопаточного канала S_2 равно 1139,80 мм^2 , что на 1,18 мм^2 больше требуемого значения 1138,62 мм^2 , и оно укладывается в допуск (в чертеже задано значение $1138,62 \pm 5,69 \text{ мм}^2$);
- Среднее значение отклонения площади межлопаточного канала ΔS_2 составляет 1,18 мм^2 , что входит в диапазон допуска $\pm 5,69 \text{ мм}^2$ от заданной в конструкторской документации величины 1138,62 мм^2 ;
- Рассчитанный в специальном программном обеспечении индивидуальный угол разворота каждой сопловой лопатки γ составил от 0,15 до 1 град., принято усреднённое значение угла разворота для всего комплекта лопаток $\gamma = 0,68$ град;
- Разворот лопаток на средний угол равный 0,68 град позволил увеличить общую ППС СА до $S_2 = 43312,40 \text{ мм}^2$ и обеспечил нахождение площади в заданный допуске $43267,6 \pm 216 \text{ мм}^2$.
- Линия тренда S_2 находится выше среднего значения допуска 1138,62 мм^2 . Линия тренда S_2 - это графическое отображение среднего значения для всех точек графика. Таким образом, дополнительный разворот всех лопаток в комплекте на средний угол 0,68 градуса позволяет обеспечить требуемую ППС СА для того же самого комплекта лопаток, у которого после литья общая ППС СА не обеспечивалась.

Результаты расчёта ППС для единичного межлопаточного канала после фактического разворота сопловых лопаток и после фактического шлифования установочных поверхностей на шлифовальном станке с ЧПУ получены следующие результаты, представленные в таблице 4.3 и на рисунке 4.3.

Таблица 4.3 Виртуальная оценка ППС СА межлопаточного канала в специальном программном обеспечении, значение площади получено после корректирующей обработки всего комплекта лопаток на расчётный угол на шлифовальном станке с ЧПУ

Единичный межлопаточного канала для лопаток, полученных после корректирующего шлифования	Фактическая площадь межлопаточного канала S_3 , мм ²	Отклонение от номинального значения 1138,62 мм ²	Угол разворота лопатки γ , град.
Меж. канал 1	1136,37	-2,25	0,68
Меж. канал 2	1143,07	4,45	0,68
Меж. канал 3	1143,86	5,24	0,68
Меж. канал 4	1139,47	0,85	0,68
Меж. канал 5	1138,77	0,15	0,68
Меж. канал 6	1147,08	8,46	0,68
Меж. канал 7	1136,11	-2,51	0,68
Меж. канал 8	1149,64	11,02	0,68
Меж. канал 9	1129,94	-8,68	0,68
Меж. канал 10	1149,48	10,86	0,68
Меж. канал 11	1150,83	12,21	0,68
Меж. канал 12	1148,45	9,83	0,68
Меж. канал 13	1143,86	-1,46	0,68
Меж. канал 14	1139,47	7,05	0,68

Продолжение таблицы 4.3

Меж. канал 15	1138,77	-10,07	0,68
...	...	...	...
Меж. канал 37	1142,56	4,03	0,68
Меж. канал 38	1147,58	8,96	0,68
Итого:	$S_3 \text{ среднее} = 1141,15$	$\Delta S_3 \text{ среднее} = 2,53$	$\gamma \text{ среднее значение} = 0,68$

На рисунке 4.3 представлен график распределения единичных межлопаточных каналов для комплекта лопаток, которые обработаны с корректирующим углом 0,68 град. на шлифовальном станке с ЧПУ.



Рисунок 4.3 Распределение площади проходного сечения единичного межлопаточного канала, которая фактически получилась после корректирующей обработки на станке с ЧПУ (указаны данные для одного комплекта лопаток)

В результате анализа графика на рисунке 4.3 и таблицы 4.3 можно сделать следующие выводы:

- 14 пар из 38 лопаток соответствует заданному допуску на ППС для единичного межлопаточного канала ($1138,62 \pm 5,69 \text{ мм}^2$);
- 7 пар лопаток находится ниже заданного значения допуска ППС для единичного межлопаточного канала ($1132,93 \text{ мм}^2$);
- 17 пара лопаток находится выше заданного значения допуска ППС для единичного межлопаточного канала ($1144,31 \text{ мм}^2$);

– Площадь проходного сечения единичного межлопаточного канала S_3 для пары лопаток находится в диапазоне значений от 1126,73 до 1154,24 мм²;

– Среднее значение площади единичного межлопаточного канала S_3 равно 1139,80 мм², что на 1,18 мм² больше требуемого значения площади проходного сечения канала, которое указано в конструкторской документации (в чертеже задано значение $1138,62 \pm 5,69$ мм²);

– Среднее значение отклонения площади межлопаточного канала ΔS_3 составляет 2,53 мм², что входит в диапазон допуска $\pm 5,69$ мм² от заданной в конструкторской документации величины 1138,62 мм²;

– Обработка сопловых лопаток со средним углом разворота 0,68 град позволила обеспечить общую ППС СА равную 43312,40 мм² и нахождение площади в заданном допуске $43267,6 \pm 216$ мм².

Из графика видно, что линия тренда S_3 находится выше середины поля допуска. Линия тренда S_3 - это графическое отображение среднего значения для всех точек графика. После сборки суммарная площадь проходного сечения соплового аппарата находится в пределах заданного поля допуска ($43267,6 \pm 216$ мм²).

По результатам расчётов в специальном программном обеспечении заполнены данные в таблице 4.4, где представлены общие результаты сравнительного расчёта площади проходного сечения единичного межлопаточного канала и общей площади проходного сечения соплового аппарата. Расчёты ППС проводились для геометрии лопаток, полученных после литья, лопаток, виртуально развёрнутых на расчётный угол и для геометрии лопаток, фактически полученных после корректирующей обработки на шлифовальном станке с ЧПУ.

Таблица 4.4 Сводная таблица площадей проходного сечения единичных межлопаточных каналов для пары лопаток

Единичный межлопаточный канал для пары рядом стоящих лопаток	$S_1, \text{мм}^2$ Площадь отлитых лопаток без разворота	$\Delta S_1, \text{мм}^2$ Отклонение от 1138,62 мм^2	$S_2, \text{мм}^2$ Виртуальная площадь с углом разворота 0,68 град.	$\Delta S_2, \text{мм}^2$ Отклонение от 1138,62 мм^2	$S_3, \text{мм}^2$ Фактическая площадь после корректиру. шлифования	$\Delta S_3, \text{мм}^2$ Отклонение от 1138,62 мм^2
Пара лопаток 1-2 (Меж. канал 1)	1136,51	-2,11	1138,51	-0,11	1136,37	-2,25
Пара лопаток 2-3 (Меж. канал 2)	1125,41	-13,21	1137,41	-1,21	1143,07	4,45
Пара лопаток 3-4 (Меж. канал 3)	1136,14	-2,48	1142,14	3,52	1143,86	5,24
Пара лопаток 4-5 (Меж. канал 4)	1123,38	-15,24	1143,38	4,76	1139,47	0,85
Пара лопаток 5-6 (Меж. канал 5)	1131,24	-7,38	1137,24	-1,38	1138,77	0,15
Пара лопаток 6-7 (Меж. канал 6)	1138,34	-0,28	1142,34	3,72	1147,08	8,46
....						
Пара лопаток 38-1 (Меж. канал 38)	1133,58	-5,04	1142,58	3,96	1147,58	8,96
Среднее значение	$S_{1\text{сред.}} =$ 1132,64	$\Delta S_{1\text{ср.}} =$ -5,98	$S_{2\text{сред.}} =$ 1139,80	$\Delta S_{2\text{ср.}} =$ 1,18	$S_{3\text{сред.}} =$ 1141,15	$\Delta S_{3\text{ср.}} =$ 2,53
Сум. ППС СА:	$\Sigma S_1 = 43040,4$		$\Sigma S_2 = 43312,4$		$\Sigma S_3 = 43363,4$	

В результате анализа данных, представленных в таблице 4.4, было выявлено следующее:

– суммарная площадь отлитых лопаток без разворота $S_1 = 43040,4 \text{ мм}^2$ меньше нижней границы допуска на $10,9 \text{ мм}^2$, что не позволит обеспечить требуемую ППС СА после сборки комплекта обработанных лопаток в сопловой аппарат;

– после виртуального разворота лопаток $S_2 = 43312,4$ суммарная ППС СА увеличилась на 272 мм^2 , и её значение превысило нижнюю границу допуска $43051,34 \text{ мм}^2$ на $261,1 \text{ мм}^2$, что входит в поле допуска ППС СА;

– после корректирующего глубинного шлифования базовых поверхностей лопатки на станке с ЧПУ для всего комплекта $S_3 = 43363,6$ суммарная ППС СА фактически увеличилась на $323,2 \text{ мм}^2$, и её значение превысило нижнюю границу допуска $43051,34 \text{ мм}^2$ на $312,3 \text{ мм}^2$ и полностью оказалось в пределах поля допуска;

– в результате после сборки соплового аппарата суммарная ППС СА составила $43363,64 \text{ мм}^2$, что обеспечивает нахождение площади в требуемом допуске от $43051,34$ до $43483,8 \text{ мм}^2$.

По результатам экспериментальных исследований построены графики (рисунок 4.4) распределения площадей проходного сечения межлопаточных каналов S , мм^2 : отлитых лопаток без разворота S_1 , после виртуального разворота лопаток S_2 и фактически полученная площадь S_3 после корректирующей обработки на шлифовальном станке с ЧПУ.



Рисунок 4.4 Распределение площади проходного сечения единичного межлопаточного канала S , мм^2 : площадь литых лопаток без разворота S_1 , виртуально рассчитанная площадь S_2 с углом разворота, фактически полученная площадь S_3 после корректирующей обработки на станке с ЧПУ

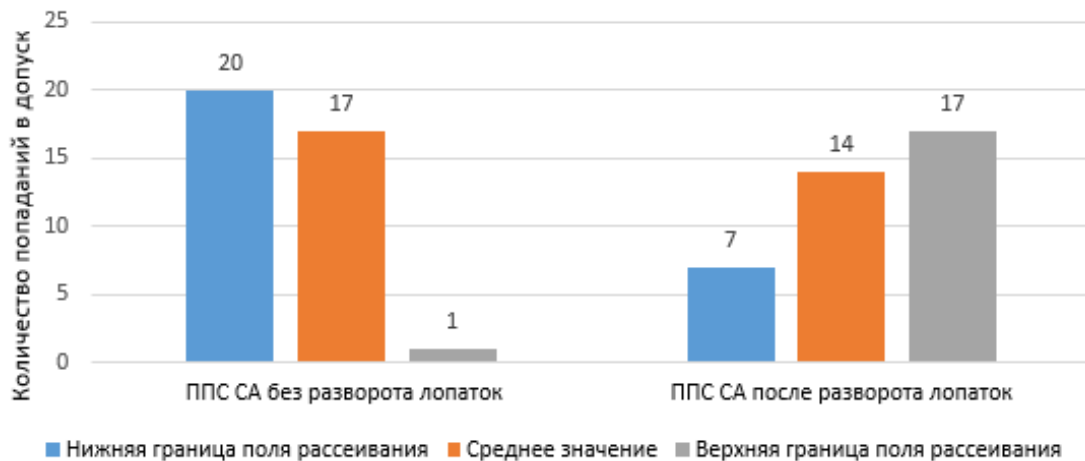


Рисунок 4.5 Распределение количества единичных межлопаточных каналов в сопловом аппарате в пределах поля допуска до и после разворота всех лопаток в одном комплекте

По результатам проведённых исследований построен график (рисунок 4.4) и гистограмма (рисунок 4.5). На графике (рисунок 4.4) представлено распределение площади проходного сечения единичных межлопаточных каналов в сопловом аппарате: после литья (без разворота лопаток), результаты виртуального расчёта с учётом угла разворота лопаток и реальные значения, полученные после обработки на шлифовальном станке с ЧПУ.

Построенная гистограмма (рисунок 4.5), показывающий распределение количества межлопаточных каналов в сопловом аппарате в пределах поля допуска, который показывает, как изменилось число межлопаточных каналов до и после разворота всех лопаток в одном комплекте.

В результате анализа графика на рисунке 4.4 и гистограмм на рисунках 4,5 и 4.6 установлено:

- линия тренда S_1 для лопаток после литья находится ниже минимального значения допуска. Около 63% межлопаточных окон не соответствуют требуемому диапазону допуска от 1132,93 до 1144,31 мм²;
- из графика на рисунке 4.2 линия S_2 виртуально развёрнутых лопаток на расчётный угол, видно, что 45% межлопаточных окон соответствует заданному

допуску. Остальные же 55% находятся близко к границам допуска, который составляет $1138,62 \pm 5,69 \text{ мм}^2$;

– после корректирующего шлифования фактическая площадь, изображенная на графике линией S_3 , оказалась близка к значениям, представленном на графике линией S_2 (рисунок 4.4). Тем не менее, отклонения от номинального значения, составляющего $1138,62 \text{ мм}^2$, стали более значительными. Только 26% межлопаточных каналов точно соответствуют заданному допуску, в то время как остальные 74% межлопаточных каналов располагаются за пределами допуска, который составляет $1138,62 \pm 5,69 \text{ мм}^2$ (рисунок 4.5). Но при этом суммарная площадь проходного сечения соплового аппарата расположена в заданном допуске $43267,6 \pm 216 \text{ мм}^2$, смотри рисунок 4.6.

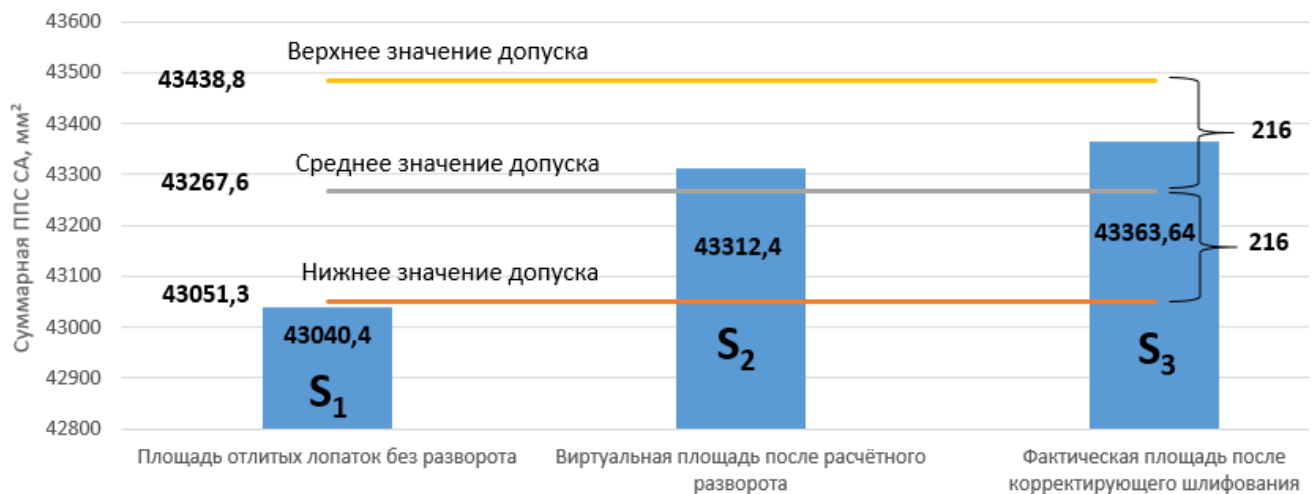


Рисунок 4.6 Суммарное значение площади проходного сечения соплового аппарата: после литья, виртуальный расчёт с углом разворота и фактическое значение площади после корректирующей обработки.

На рисунке 4.6 наглядно представлено изменение суммарной площади ППС СА для одного комплекта лопаток, который прошел все стадии нового технологического процесса. Видно, что сопловые лопатки, полученные после литья, не обеспечивают суммарную площадь проходного сечения соплового аппарата. Однако, если тот же комплект лопаток виртуально развернуть на расчётный угол, то этот же комплект лопаток сможет обеспечить необходимую

суммарную площадь проходного сечения соплового аппарата, которая будет находиться в пределах заданного допуска $43267,6 \pm 216 \text{ мм}^2$. Для лопаток, которые обработали с использованием корректирующего угла разворота, суммарная площадь проходного сечения соплового аппарата также находится в пределах заданного допуска. При этом фактическая суммарная площадь проходного сечения соплового аппарата близка к среднему значению допуска.

4.2 Результаты практической реализации новой технологии по повышению производительности, а также точности изготовления сопловых лопаток и сборки сопловых аппаратов турбин

Применение многоосевого шлифовального оборудования с ЧПУ, специального программного обеспечения и оптический метод контроля позволили реализовать новую технологию обработки сопловых лопаток. Результаты проведенных исследований внедрены в технологический процесс обработки сопловых лопаток на пятиосевом профилешлифовальном станке с ЧПУ на предприятии АО «ОДК-Авиадвигатель» [70, 103, 137]. Благодаря этому стало возможным выполнение корректирующего шлифования установочных поверхностей сопловой лопатки и гарантированно обеспечивать общую площадь проходного сечения соплового аппарата после сборки обработанных по этой технологии лопаток в узел.

На предприятии АО «ОДК-Авиадвигатель» внедрена новая технология обработки сопловых лопаток. По данной технологии изготовлено 40 комплектов сопловых лопаток второй ступени турбины высокого давления, что составляет порядка 1520 лопаток. Все изготовленные комплекты лопаток с первого раза обеспечили необходимую общую площадь проходного сечения соплового аппарата после их сборки в узел в сборочном цеху.

Результаты исследования внедрены на АО «ОДК-Авиадвигатель» при обработке сопловых лопаток второй ступени ТВД. За счёт повышения производительности изготовления лопаток на 45% и сборки на 50%

экономический эффект составил более 2-х млн руб., а также все собранные сопловые аппараты обеспечили площадь проходного сечения соплового аппарата турбины газотурбинного двигателя с первого раза.

Результаты работы были переданы для внедрения новой технологии на предприятии АО «ОДК-Пермские моторы». Кроме того, результаты работы переданы и внедрены в учебный процесс ФГАОУ ВО «ПНИПУ». Акты внедрения представлены в приложениях 1, 2 и 3.

Выводы по главе 4

1. По результатам расчёта, выполненного с помощью специального программного обеспечения, и измерений, выполненных на оптическом комплексе ATOS, выполнена виртуальная оценка площади проходного сечения межлопаточных каналов для лопаток, полученных после литья (без разворота). Площадь составила $43040,4 \text{ мм}^2$, что меньше требуемого значения $43267,6 \pm 216 \text{ мм}^2$ и меньше нижней границы допуска, равной $43051,3 \text{ мм}^2$.

2. В результате расчёта, выполненного с помощью специального программного обеспечения, и измерений, выполненных на оптическом комплексе ATOS, выполнена виртуальная оценка площади проходного сечения межлопаточных каналов для того же комплекта сопловых лопаток, но уже развернутых на расчётный угол $0,68$ град. Получена площадь, равная $43312,4 \text{ мм}^2$, которая оказалась в пределах требуемого диапазона $43267,56 \pm 216 \text{ мм}^2$ и немного превысила середину допуска, равного $43267,56 \text{ мм}^2$.

3. В результате расчёта, выполненного с помощью специального программного обеспечения, и измерений, выполненных на оптическом комплексе ATOS, выполнена виртуальная оценка площади проходного сечения межлопаточных каналов для сопловых лопаток, обработанных с корректирующим углом равным $0,68$ градусов. В результате получена площадь, равная $43363,64 \text{ мм}^2$. Эта площадь, как и при виртуальном развороте, оказалась в

пределах заданного допуска $43267,56 \pm 216 \text{ мм}^2$, а её значение также превышает середину поля допуска, составляющую $43267,56 \text{ мм}^2$.

4. Реальная обработка комплекта сопловых лопаток подтвердила достоверность гипотезы о возможности разворота сопловых лопаток на расчётный угол, что в свою очередь, способствует увеличению общей площади проходного сечения соплового аппарата. Это позволяет гарантировать, что необходимая площадь проходного сечения соплового аппарата будет достигнута на сборке с первого раза.

5. Разработанная новая технология обработки сопловых лопаток, которая позволила увеличить производительность обработки лопаток и повысить точность изготовления сопловых лопаток, что в результате позволило гарантированно обеспечивать сборку соплового аппарата турбины с первого раза и с требуемыми параметрами общей ППС СА.

6. Новая технология обработки сопловых лопаток, внедрённая на предприятии АО «ОДК-Авиадвигатель», повысила производительность обработки 45% по сравнению с серийной технологией.

7. Производительность процесса сборки увеличилась на 50% благодаря сокращению времени, затрачиваемого на: переборку (повторную разборку и сборку соплового аппарата для обеспечения необходимой общей площади проходного сечения соплового аппарата), транспортировку соплового аппарата из сборочного цеха в механический и обратно для выполнения переборки, контроль общей площади проходного сечения соплового аппарата.

8. Процесс контроля общей площади проходного сечения соплового аппарата в механическом и сборочном цехах был модернизирован. Ручной контроль с использованием универсального и специального инструмента заменён на автоматизированный оптический метод контроля. В результате это позволило обеспечить высокую сходимость результатов проверки общей площади проходного сечения соплового аппарата в механическом и сборочном цехах.

9. Экономический эффект от внедрения новой технологии составил более 2-х млн руб. в год только за счёт исключения затрат на изготовление новых стапелей для обработки радиальных поверхностей для новой геометрии лопаток.

Заключение

1. В результате анализа проблем и поиска путей их решения установлено, что для обеспечения ППС СА требуется изготовление дополнительных лопаток и их селективная переборка, процесс доработки весьма трудоёмкий.

2. Для решения проблем низкой производительности и точности обработки сопловых лопаток использован современный пятиосевой профилишлифовальный станок с ЧПУ, высокопористые шлифовальные круги, непрерывная правка круга и метод глубинного шлифования установочных поверхностей лопатки.

3. Разработана линейная регрессионная зависимость, которая устанавливает взаимосвязь угла разворота сопловой лопатки вокруг своей оси и общей площади проходного сечения собранного соплового аппарата. Впервые появилась возможность управлять величиной общей площади проходного сечения соплового аппарата до начала обработки установочных поверхностей сопловой лопатки на многоосевом шлифовальном станке с ЧПУ.

4. Для реализации нового технологического процесса разработано специальное программное обеспечение, которое позволяет выполнить виртуальную сборку соплового аппарата из оцифрованных сопловых лопаток и достоверно спрогнозировать общую площадь проходного сечения соплового аппарата после сборки обработанных лопаток в узел. СПО достоверно прогнозирует значение площади проходного сечения относительно реальной площади проходного сечения соплового аппарата, которое измеряется после сборки обработанных по новой технологии лопаток в единый узел.

5. Представлено обоснование алгоритма выполнения нового технологического процесса с использованием СПО, что позволяет обеспечить общую площадь проходного сечения соплового аппарата за счёт оптического контроля площади проходного сечения соплового аппарата отлитых лопаток и добавления дополнительного угла разворота на этапе механической обработки установочных поверхностей лопатки.

6. Разработана методика проверки технологического процесса по оценке влияния угла разворота лопатки на изменение общей площади проходного сечения соплового аппарата после сборки в узел.

7. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность разработанного нового технологического процесса по гарантированному обеспечению площади проходного сечения соплового аппарата после корректирующей обработки сопловых лопаток на пятиосевом профилишлифовальном станке с ЧПУ.

8. Новый технологический процесс изготовления сопловых лопаток внедрён на производстве АО «ОДК-Авиадвигатель» с получением следующих результатов:

- обработано 40 комплектов сопловых лопаток второй ступени ТВД (1520 лопаток). Все комплекты гарантированно обеспечили общую площадь проходного сечения соплового аппарата с первого раза в сборочном цеху;

- экспериментально доказано, что повысилась производительность обработки сопловых лопаток на 45% за счёт замены универсального шлифовального оборудования на пятиосевой профилишлифовальный станок с ЧПУ, который позволил минимизировать число операций, повысил производительность обработки и улучшил качество изготовления лопаток;

- повышена производительность процесса сборки сопловых аппаратов в 1,5-2 раза за счёт исключения времени на селективную подборку сопловых лопаток и неоднократного возврата, собранного соплового аппарата из сборочного в механический цех на доработку;

- полностью исключены расходы на изготовление дорогостоящих стапелей (не менее 2-х млн руб. в год), которые требуются для обработки каждого типа сопловых лопаток на токарно-лобовом станке.

Список сокращений и условных обозначений

3D – модель объекта в трехмерном пространстве;

ATOS – система оптическая координатно-измерительная топометрическая;

Geomagic Qualify – программное обеспечение для трехмерного цифрового моделирования физических объектов;

GOM – программное обеспечение которое позволяет получать сканы трехмерных данных поверхности объекта исследования, автоматически сшивать их, преобразовывать в облако точек, и сохранять в виде файла трехмерного облака точек в универсальных форматах;

NX – CAD/CAM/CAE-система производства компании Siemens PLM Software;

АО – акционерное общество;

АСУ – автоматизированная система управления;

АСУП – автоматизированная система управления предприятием;

БД – база данных;

ГМ – геометрическая модель;

ГТД – газотурбинный двигатель;

ИСО – Международная организация по стандартизации;

КПД – коэффициент полезного действия;

мкм – микрометр;

мм – миллиметр;

ОАО – открытое акционерное общество;

ОДК – объединённая двигателестроительная корпорация;

ОС – операционная система;

ПО – программное обеспечение;

РФ – Российская Федерация;

СА – сопловой аппарат;

СЛ – сопловая лопатка;

СОЖ – смазочно-охлаждающая жидкость;

СПО – специальное программное обеспечение;

ЧПУ – числовое программное управление.

Список использованных источников

1. **Адлер, Ю. П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю.В. - М.: Наука – 1976. – 279 с.
2. **Акимов, Л. М.** Выносливость жаропрочных материалов. / Л. М. Акимов – М.: Металлургия, 1977. – 152 с.
3. **Базров, Б. М.** Основы технологии машиностроения / Базров Б. М. М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
4. **Безъязычный, В. Ф.** Автоматизация технологии изготовления газотурбинных авиационных двигателей / В.Ф. Безъязычный, В.Н. Крылов, В.А. Полетаев и др. – М.: Машиностроение, 2005. – 566 с.
5. **Безъязычный, В. Ф.** Влияние качества поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин / В.Ф. Безъязычный // Приложение. Справочник. Инженерный журнал, 2001. – № 4. – С. 9-16.
6. **Безъязычный, В. Ф.** Метод подобия в технологии машиностроения / В.Ф. Безъязычный. М.: Машиностроение, 2012. – 320 с.
7. **Безъязычный, В. Ф.** Оптимизация технологических условий механической обработки деталей авиационных двигателей. / В. Ф. Безъязычный, Т. Д. Кожина, А. В. Константинов и др. – М.: Изд-во МАИ, 1993. – 184 с.
8. **Безъязычный, В. Ф.** Разработка теоретических основ технологического качества и эффективности механической обработки деталей авиационных двигателей: дисс. док. техн. наук: 05.02.08 / Безъязычный Вячеслав Феофистович – Москва: МАТИ, 1982. – 356 с.
9. **Безъязычный, В. Ф.** Технологические процессы механической и физико-химической обработки в авиадвигателестроении: Учебное пособие. / В. Ф. Безъязычный, М. Л. Кузменко, А. В. Лобанов, Ю. К. Чарковский, Е. В. Шилков, И. Д. Юдин – М.: Машиностроение, 2001. – 290 с.

10. Безъязычный, В. Ф., Чарковский Ю. К., Крылов В. Н. Технологические методы обеспечения надежности и длительной работоспособности авиационных двигателей и газотурбинных установок: Учебное пособие. – Рыбинск: РГАТА, 2004. – 79 с.
11. Биргер, И. А. Остаточные напряжения / Биргер, И.А. - М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
12. Бишутин, С. Г. Износостойкость сформированных при шлифовании поверхностных слоев деталей машин: Монография / С. Г. Бишутин, М. И. Прудников; под ред. С. Г. Бишутина. – Брянск: БГТУ, 2010. – 100 с.
13. Бочкарев, П. Ю. Развитие теории и принципов планирования многономенклатурных технологических процессов механообработки и сборки. / Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2024. – № 9 (159). – С. 25-32.
14. Братухин, А. Г. Основы технологии создания газотурбинных двигателей для магистральных самолетов. / А. Г. Братухин, Ю. Е. Решетников, А.А. Иноземцев и др. – М.: Авиатехинформ, 1999. – 554 с.
15. Волков, Д. И. Математическое моделирование и оптимизация процесса высокопроизводительного шлифования с учетом анализа устойчивости термомеханических явлений: дисс. док. техн. наук: 05.02.07 / Волков Дмитрий Иванович. – Рыбинск, 1997. – 409 с.
16. Волков, Д. И. Оптимизация процесса глубинного шлифования. / Д. И. Волков, Н.С. Рыкунов // Вестник Верхневолжского отделения академии технолог. наук РФ: Сер. Высокие технологии в машиностроении и приборостроении. Вып. 1. – Рыбинск, 1994. – С. 43-50.
17. Волков, Д. И. Процесс глубинного шлифования деталей газотурбинных двигателей / Волков, Д. И., Крылов В. Н., Рыкунов Н. С. // Газотурбинные технологии. – Рыбинск, 2001. - №5. – С. 16-19.
18. Волков, Д. И. Технологическое обеспечение качества торцевых диаметральных канавок блоков сопловых лопаток / Волков, Д. И., Цветков Е. В. // Проблемы качества машин и их конкурентоспособности: Материалы 6-й

Международной научно-технической конференции, г. Брянск, 22-23 мая 2008 г. – Брянск: БГТУ. – С. 167-168.

19. **Волков, С. А.** Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей на основе оптимизации маршрута и условий обработки: дисс. канд. техн. наук: 05.02.08 / С. А. Волков – Рыбинск, 2003 – 288 с.

20. Высокоскоростное маятниковое шлифование сплава на основе никеля. MOTION. Корпоративный журнал группы предприятий SCHLEIFRING. Выпуск 1. – 2009.

21. **Големи, С.** Технологическое обеспечение минимальной неуравновешенности масс при изготовлении высокопористых шлифовальных кругов: дисс. канд. техн. наук: 05.02.08 / Големи С. – Москва, 2006. – 115 с.

22. **Горин, Н. А.** Разработка высокоструктурного абразивного инструмента и анализ эффективности его применения при профильном глубинном шлифовании лопаток газотурбинных двигателей: дисс. канд. техн. наук: 05.02.07 / Горин Николай Андреевич – Москва, 2013. – 168 с.

23. ГОСТ 23537-79. Лопатки авиационных осевых компрессоров и турбин. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1979. – 33 с.

24. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М.: Изд-во стандартов. – 1973. – 7 с.

25. ГОСТ 3647-80. Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля. - М.: Изд-во стандартов. – 1980. – 27 с.

26. ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Геометрические характеристики изделий. Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. – М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ». – 2016 – 18 с.

27. **Дитман, К.** Высокоскоростное шлифование – современный метод обработки металлов резанием. / К. Дитман, К. Гюринг // СТИН. – 1988. – №12. – С. 21-24.

28. **Дьяченко, П. Е.** Исследование процесса шлифования / Дьяченко П.Е. М.: Оборонгиз, 1941. – 200 с.
29. **Евсеев, Д. Г.** Физические основы процесса шлифования. / Д. Г. Евсеев, А. Н. Сальников. – Саратов: СГУ, 1978. – 128 с.
30. **Елисеев, Ю. С.** Новый инструмент для глубинного шлифования хвостовиков турбинных лопаток / Ю. С. Елисеев, В. К. Старков, С. А. Рябцев // Авиационная промышленность, 2000. – №4. – С. 36–44.
31. **Ермолаев, В.К.** Современные шлифовальные станки: новые методы абразивной обработки (часть 1) //РИТМ машиностроения, 2017 – №10 – С. 28-33
32. **Ермолаев, В.К.** Триада глубинного шлифования – синергия его эффективности // РИТМ машиностроения, 2022 – №3 – С. 34-42
33. **Захаренко, И. П.** Глубинное шлифование кругами из сверхтвёрдых материалов / И. П. Захаренко, Ю. Я. Савченко, В. И. Лавриненко. – М.: Машиностроение, 1988. – 56 с.
34. **Зубарев, Ю. М.** Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов: Учебное пособие. / Ю. М. Зубарев, А. В. Приемышев – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 304 с.
35. **Зубарев, Ю. М.** Устойчивость процесса шлифования с учетом его динамических характеристик. / Ю.М. Зубарев, А.В. Приемышев – СПб.: Издательство Политехн. ун-та, 2016. – 388 с.
36. **Зубарев, Ю. М., Приемышев А. В.** Устойчивость процесса шлифования с учетом его динамических характеристик. СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2016. – 388 с.
37. **Иноземцев, А. А., Сандрацкий В. Л.** Газотурбинные двигатели. – Пермь, 2006. – 1195 с.
38. **Исаев, А. И.** Методика расчёта температур при шлифовании / А. И. Исаев, С. С. Силин. // Вестник машиностроения, 1957. – №5. – С. 54-59.
39. **Исаев, А. И.** Процесс образования поверхностного слоя при обработке металлов резанием. / А. И. Исаев – М.: Машгиз, 1950. – 320 с.

40. **Исаев, А. И.** Шлифование фасонных поверхностей. / А. И. Исаев, А.Н. Филин, М.С. Злотников, В.Ф. Совкиев – М.: Машиностроение, 1980. – 152 с.
41. **Калин, Е. П.** Теория и практика управления производительностью шлифования без прижогов с учетом затупления инструмента / Е. П. Калинин. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 358 с.
42. **Калинин, Е. П.** Анализ схемы расположения абразивных зерен в объеме шлифовального круга. / Е. П. Калинин, М. А. Шашков // Известия вузов. Машиностроение. –1986. – №6. – С. 136-140.
43. **Калинин, Е. П.** Научные основы интенсивного бесприжогового шлифования сталей и сплавов с учетом степени затупления инструмента: дисс. док. техн. наук: 05.02.08 – Санкт-Петербург, 1995. – 246 с.
44. **Калинин, Е. П.** Теория и практика управления производительностью шлифования без прижогов с учетом затупления инструмента. / Е. П. Калинин – СПб.: Изд-во Политехн. унта, 2009. – 358 с.
45. **Капанец, Э. Ф.** Точность обработки при шлифовании. / Э. Ф. Капанец, К. К. Кузьмич, В. И. Прибыльский, Г. В. Тилигузов, под ред. П.И. Ящерицына. – Минск: Наука и техника, 1987. – 152 с.
46. **Капанец, Э. Ф.** Точность обработки при шлифовании. / Э. Ф. Капанец, К. К. Кузьмич, В. И. Прибыльский, Г. В. Тилигузов, под ред. П.И. Ящерицына. – Мн.: Наука и техника, 1987. – 152 с.
47. **Кащук В. А., Верещагин А. Б.** Справочник шлифовщика. / М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.
48. **Кирчанов, В. П.** Особенности глубинного шлифования деталей из литейных жаропрочных никелевых сплавов. / В. П. Кирчанов, В. Ф. Макаров, Ю. В. Доронин // СТИН, 1994. – №6. – С. 34-37.
49. **Киселев, Е. С.** Влияние режима шлифования на эксплуатационные характеристики деталей из титановых сплавов. / Е. С. Киселев, А. Б. Маркелов // Вестник машиностроения, 1992. – №3. – С. 54-56.

50. **Колесников, К. С.** Технологические основы обеспечения качества машин / К. С. Колесников, Г. Ф. Баландин, А. М. Дальский и др. / под ред. К.С. Колесникова. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
51. **Корчак, С. Н.** Производительность процесса шлифования стальных деталей. / С. Н. Корчак - М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
52. **Крымов, В.** Глубинное шлифование лопаток турбин / В. Крымов //Авиапанорама, 1998. – С. 54-55.
53. **Леонов, Б. Н.** Технологическое обеспечение проектирования и производства газотурбинных двигателей. / Б. Н. Леонов, А. С. Новиков, Е. Н. Богомолов, Л. Б. Уваров, Е. А. Антонов, А. А. Жуков – г. Рыбинск, издание ОАО «Рыбинский Дом печати», 2000. – 406 с.
54. **Лысанова, В. С.** Эльбор в машиностроении / Под ред. В. С. Лысанова. – Л.: Машиностроение, 1978. – 280 с.
55. **Макаров, А. Д.** Влияние режимов резания на эксплуатационные свойства деталей из жаропрочных материалов / А. Д. Макаров, В. С. Мухин // Алмазно-абразивная обработка. – Пермь: ППИ, 1970. – С. 123-126.
56. **Макаров, А. Д.** Оптимизация процессов резания. / А. Д. Макаров – М.: Машиностроение, 1976. – 264 с.
57. **Макаров, В. Ф.** Автоматизированный расчет величин смещений сопловых лопаток турбины с обеспечением заданного проходного сечения соплового аппарата / В. Ф. Макаров, А.О. Норин // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации, – 2015. Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции. – Пермь, 2015. – С. 109-112.
58. **Макаров, В. Ф.** Влияние локальных технологических концентраторов напряжений на эксплуатационные свойства обрабатываемых деталей. / В. Ф. Макаров, М. В. Песин, С. П. Никитин, А. С. Горбунов // Наукоемкие технологии машиностроения, 2017 – №5(71) – С. 31-37.

59. **Макаров, В. Ф.** Выбор высокоэффективных абразивных инструментов и режимов резания для различных видов шлифовальных заготовок: учебное пособие / В.Ф. Макаров // – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 275 с.

60. **Макаров, В. Ф.** Исследование эффективности работы высокопористых кругов различных фирм. / В. Ф. Макаров, В. П. Кирчанов, А. Н. Попов, В. В. Семиколенных // Механика и технология материалов и конструкций: сб. науч. трудов №1. – Пермь: ОЦНИТ ПГТУ, 1998, – С. 111-116.

61. **Макаров, В. Ф.** Кинематика формообразования элементарных поверхностей при глубинном профильном шлифовании турбинной лопатки. / В. Ф. Макаров, С. П. Никитин // Вестник Рыбинского гос. авиац. технологического университета им. П.А. Соловьева. – 2017. – №1(40). – С. 173-181.

62. **Макаров, В. Ф.** Методика испытаний высокопористых шлифовальных кругов по критерию сопротивления усталости хвостовиков турбинных лопаток / В. Ф. Макаров, А. Н. Попов, В. В. Семиколенных // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Сб. статей международной научно-техн. конф. – Волжский, 2001. – С. 91-93.

63. **Макаров, В. Ф.** Научоемкая технология глубинного шлифования профильных поверхностей лопаток турбин. / В. Ф. Макаров, А. Х. Сакаев // Научоемкие технологии в машиностроении. – 2012. – №3(9). – С. 15-22.

64. **Макаров, В. Ф.** О новой концепции создания отечественных высокопористых кругов для глубинного шлифования лопаток ГТД / В.Ф. Макаров, В. П. Кирчанов, В. В. Семиколенных, А. Н. Попов // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: сб. труд. межд. науч.-тех. конф. «Шлифабразив-2000» – Волжский: ВолжИСИ, 2000. – С. 79-81.

65. **Макаров, В. Ф.** Особенности применения многокоординатных шлифовальных станков с ЧПУ для повышения производительности, качества, точности обработки деталей и узлов авиационных газотурбинных двигателей / В.Ф. Макаров, М. В. Песин, А. О. Норин // Транспортное машиностроение, 2023 - №2(14) – С. 19-26.

66. **Макаров, В. Ф.** Повышение качества и производительности при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток. / В. Ф. Макаров, С. П. Никитин // Научно-технические технологии машиностроения, 2016 – №5(59). – С. 17-24.

67. **Макаров, В. Ф.** Повышение производительности, качества и точности деталей авиационных двигателей на основе рационального применения многокоординатных шлифовальных станков с ЧПУ / В. Ф. Макаров, М. В. Песин, А. О. Норин // Станкоинструмент, 2023 - №1(030) – С. 42-46.

68. **Макаров, В. Ф.** Повышение точности проходного сечения сопловых аппаратов турбин путем внесения коррекции установки при глубинном многоосевом шлифовании на станке с числовым программным управлением / В. Ф. Макаров, М. В. Песин, А. О. Норин // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение, 2022 – Т.24, №2 – С. 46-53.

69. **Макаров, В. Ф.** Повышение точности проходного сечения сопловых лопаток турбин / Макаров В. Ф., Туранский Р. А., Григорьева А. В. // Актуальные проблемы современного машиностроения: сборник трудов Международной научно-практической конференции, г. Юрга, 2014 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Юргинский технологический институт (ЮТИ); ред. кол. Д. В. Валув [и др.]. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – Томск – С. 291-295.

70. **Макаров, В. Ф.** Повышение точности проходного сечения сопловых лопаток турбин, / Макаров В. Ф., Туранский Р. А., Григорьева А. В. // Журнал: инновационные технологии: теория, инструменты, практика – Т. 2 – 2014. – С. 399-405.

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

72. **Макаров, В. Ф.** Резание материалов: учебное пособие / В. Ф. Макаров. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – 364 с.

73. **Макаров, В. Ф.** Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов: учебное пособие. – СПб.: Изд-во «Лань», 2013. – 320 с.

74. **Макаров, В. Ф.** Теплофизические особенности глубинного шлифования кругами с двойной пористостью. / В. Ф. Макаров, В. П. Кирчанов, А. Н. Попов, В. В. Семиколенных // Теплофизика технологических процессов: Тезисы докладов X Всероссийской науч.– тех. конф. – Рыбинск: РГАТА, 2000. – С. 43-44.

75. **Макаров, В. Ф.** Технологическое обеспечение точности изготовления сопловых лопаток турбин при глубинном многоосевом шлифовании на станке с ЧПУ / В. Ф. Макаров, Р.А. Туранский, А.В. Григорьева // Научно-технические технологии в машиностроении, 2016 - №1 – С. 34-37.

76. **Малкин, С.** Тепловые аспекты шлифования. Часть 1. Разделение полной работы шлифования / С. Малкин, Р. Андерсон // Конструирование и технология машиностроения, 1974. – №4. – С. 84-91.

77. **Марков, А. М.** Повышение производительности и обеспечение точности изготовления деталей с пространственно-сложными поверхностями путем совершенствования технологических систем: дисс. док. техн. наук: 05.02.08 / Марков Андрей Михайлович – Барнаул, 2002. – 384 с.

78. **Маслов, Е. Н.** Теория шлифования материалов. / Е. Н. Маслов – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.

79. **Маталин, А. А.** Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты». / А. А. Маталин – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

80. **Михрютин, В. В.** Повышение эффективности глубинного шлифования путем стабилизации термодинамических условий обработки: дисс. канд. техн. наук: 05.02.08 / В. В. Михрютин – Рыбинск, 1994. – 230 с.

81. **Михрютин, О. В.** Повышение эффективности шлифования деталей ГТД на основе контроля качества абразивного инструмента с учетом структурной неоднородности: дисс. канд. техн. наук: 05.03.01 / Михрютин Олег Владимирович – Рыбинск, 2000. – 158 с.

82. **Мубаракшин, Р. М.** Оптимизация вариантов технологий и методов шлифования лопаток газотурбинных двигателей // Технология машиностроения. 2018. – №2. – С. 10-20.

83. **Никитин, С. П.** Влияние режимов резания на средние температуры при глубинном шлифовании. / С.П. Никитин // Вестник УГАТУ. Уфа, Россия, 2012. – Т.16. – №4(49). – С. 78-84.

84. **Никитин, С. П.** Математическое моделирование термомеханических процессов в зоне резания элементарных поверхностей при профильном глубинном шлифовании, обеспечивающее заданный предел выносливости лопаток турбин ГТД. дисс. д-ра техн. наук: 05.02.08 – Пермь, 2019. – 446 с.

85. **Никитин, С. П.** Управление качеством поверхностного слоя лопатки при глубинном шлифовании / Никитин С. П, Макаров В. Ф. // Вектор науки ТГУ. 2015. – № 2 (32-2). – С. 100-103.

86. **Николаенко, А. А.** Моделирование и расчёт высокопроизводительных автоматических циклов плоского глубинного профильного шлифования для станков с ЧПУ: дис. док. техн. наук: 05.02.08 / Николаенко Александр Алексеевич – Челябинск, 1998. – 349 с.

87. **Нихамкин, М. А.** 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.

88. **Новиков, Ф. В.** Математическая модель определения температуры при глубинном шлифовании / Ф. В. Новиков, О. С. Кленов // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – Вып. 76. – С. 133-141.

89. **Новоселов, Ю. К.** Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. / Ю. К. Новоселов – Изд. Саратовского ун-та, 1979. – 232 с.
90. **Новоселов, Ю. К.** Обеспечение стабильности точности детали при шлифовании. / Ю. К. Новоселов, Е. Ю. Татаркин – Саратов, изд. Саратовского ун-та, 1988. – 128 с.
91. **Осипович, Д. А.** Разработка технологии цифровой сборки сопловых аппаратов турбины ГТД на основе измерений лопаток фотограмметрическим методом: дисс. канд. техн. наук: 05.02.08 / Осипович Дарья Андреевна – Пермь, 2019. – 178 с.
92. **Осипович, Д. А.** Анализ направлений модернизации методики определения фактической площади проходного сечения соплового аппарата по данным оцифровки на измерительном комплексе ATOS / Осипович Д.А., Ярушин С.Г., Червонных С.А. // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – №3. – С. 29-34.
93. **Осипович, Д. А.** Исследование алгоритмов подбора лопаток при сборке сопловых аппаратов газотурбинного двигателя / Осипович Д.А., Ярушин С. Г., Макеев А.Б. // Сборка в машиностроении, приборостроении, Москва. – 2018 – №7(216). – С. 313-319.
94. **Осипович, Д. А.** Математическое моделирование процесса трехмерной оптической оцифровки геометрии / Осипович Д. А., Ярушин С. Г., Мельников С. А. // Научное обозрение, Саратов. – 2015 – №17. С. 165-172.
95. **Осипович, Д. А.** Оценка применимости оптических методов измерений геометрических параметров для обеспечения качества деталей ГТД / Осипович Д. А., Нуртдинов А. С. // Естественные и технические науки. Москва. – 2015 – №8(86). – С. 38-43.

96. **Осипович, Д. А.** Разработка технологического процесса контроля деталей типа «рабочее колесо» с использованием оптических методов измерения. // Ползуновский вестник. Барнаул. – 2012 – №2/1. – С. 184-187.
97. **Осипович, Д. А.** Способ контроля геометрии проходного сечения лопаточной решетки соплового аппарата с использованием технологии оптических измерений. // Ползуновский вестник. Барнаул, – 2013 – №2. – С. 187-191.
98. **Островский, В. И.** О физико-химических процессах при шлифовании титановых сплавов / В. И. Островский // Абразивы: науч. технич. реф. сб. М.: НИИМАШ, 1967. – №1. – С. 1-14.
99. **Пилинский, А. В.** Инновационные методы и вызовы в скоростном и ультразвуковом шлифовании / Вектор науки ТГУ, 2015. – № 2 (32-2).
100. **Пилинский, А. В.** Современные тенденции применения и развития процессов шлифования в США / Вектор науки ТГУ, 2012. – № 4 (22).
101. **Подураев, В. Н.** Резание труднообрабатываемых материалов. Учебное пособие для вузов. / В. Н. Подураев – М.: Высшая школа, 1974. – 587 с.
102. **Поклад, В. А.** Профильное глубинное шлифование деталей из титановых сплавов // Технология машиностроения. – 2002. №3. – С. 14-22.
103. **Полетаев, В. А.** Автоматизированное производство лопаток ГТД: Библиотека технолога. / В. А. Полетаев, Е. В. Цветков, Д. И. Волков // Москва : Инновационное машиностроение, 2016. – 261 с.
104. **Полетаев, В. А.** Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотека технолога. / В. А. Полетаев, Д. И. Волков. – Москва : Машиностроение, 2009. – 272 с.
105. **Полетаев, В. А.** Основные технологические принципы автоматизированного производства лопаток ГТД // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2012. – №8. – С.11-16.
106. **Полетаев, В. А.** Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.

107. **Полетаев, В. А.** Технология автоматизированной комплексной обработки лопаток турбин методами высокопроизводительного шлифования, многоцелевые шлифовальные станки и высокоструктурный абразивный инструмент для ее реализации: монография / В. А. Полетаев [и др.]; под ред. В. А. Полетаева, В. К. Старкова. – Москва: Машиностроение, 2013. – 104 с.

108. **Полетаев, В. А.** Технология автоматизированной комплексной обработки лопаток турбин методами высокопроизводительного шлифования, многоцелевые шлифовальные станки и высокоструктурный абразивный инструмент для ее реализации. / В. А. Полетаев, В. К. Старков, В. Н. Крылов, В. С. Стогов, А. А. Гудков, С. А. Рябцев, Е. В. Цветков, Я. В. Афиногенов, А. Н. Довгаль, В. В. Митрофанова – М.: Машиностроение, 2013. – 122 с.

109. **Полетаев, В. А.** Экспериментальное исследование инструментов из карбида кремния при глубинном шлифовании титанового сплава ОТ4 / Полетаев, В. А., Волков Д. И., Цветков Е. В. // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П. А. Соловьева. – Рыбинск, 2010. №1(16). – С. 97-102.

110. **Попов, А. Н.** Повышение производительности профильного глубинного шлифования при обеспечении качества поверхностного слоя и сопротивления усталости турбинных лопаток: дисс. канд. техн. наук: 05.02.08 / Попов Алексей Николаевич – Рыбинск, 2005. – 189 с.

111. **Попов, В. С.** Изнашивающаяся способность и механические свойства зерен абразивов / В. С. Попов, А. Б. Шишкин // Абразивы: науч. технич. реф. сб.- М.: НИИМАШ, 1970. – №6. – С.20-23.

112. **Попов, С. А.** Влияние однородности зернового состава абразива и формы зерен на рельеф режущей поверхности шлифовальных кругов / С. А. Попов, И. С. Соколова // Абразивы: науч. технич. реф. сб.- М.: НИИМАШ, 1972. – №12. – С.2-6.

113. Прибор для контроля площади сечения сопловых аппаратов БВ-7631 [электронный ресурс]. – Режим доступа: https://micron.ru/production/speci_a_l_instruments/bv-7631?ysclid=m7dgdw9re7t329397493 Дата обращения: 24.06.2016

114. Приложение к свидетельству № 52362 об утверждении типа средств измерений. Описание типа средства измерения. Системы оптические координатно-измерительные топометрические ATOS. [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://saprd.ru/grsi/54916-13/2013-54916-13.pdf?ysclid=m7de2mzhss949017612> Дата обращения: 18.06.2020

115. Приложение к свидетельству № 74046 об утверждении типа средств измерений. Описание типа средства измерения. Системы оптические координатно-измерительные топометрические ATOS. [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ktopoverit.ru/prof/opisanie/75187-19.pdf> Дата обращения: 18.06.2020

116. Испытательный стенд для определения пропускной способности сопловых аппаратов вертолетного двигателя типа ВК-2500 [электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.aex.ru/news/2016/1/18/148135/print/?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera Дата обращения: 18.06.2020

117. Портальные измерительные машины Zeiss prismo family [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.zeiss.com.sg/metrology/systems/cmms/bridge-type-cmms/prismo-family/prismo-ultra.html> Дата обращения: 20.05.2024

118. **Резникова, А. Н.** Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник. / А. Н. Резникова. - М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.

119. **Рыжов, Э. В.** Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке. / Э. В. Рыжов, А. А. Сагарда, В. Б. Ильицкий, П. Х. Чеповецкий, под ред. А. А. Сагарды. – Киев: Наукова думка, 1979. – 244 с.

120. **Рыжов, Э. В.** Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. / Э. В. Рыжов, А. Г. Суслов, В. П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.

121. **Рыкунов, Н. С.** Повышение эффективности обработки секторов соплового аппарата путем применения многокоординатного глубинного шлифования / Рыкунов, Н. С., Цветков Е. В., Никонов С. Ю. // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов XV Международной научно-технической

конференции в г. Севастополе 15-20 сент. 2008 г. В 4-х т. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – Т.3. – С. 134-138.

122. **Рыкунов, Н. С.** Теория и практика применения процессов глубинного шлифования для повышения производительности и качества обработки деталей из жаропрочных сплавов: дисс. док. техн. наук: / Н.С. Рыкунов – М., 1988. – 436 с.

123. **Рябцев, С. А.** Разработка абразивного инструмента с повышенной структурностью и управляемой пористостью для высокопроизводительного шлифования фасонных поверхностей деталей из труднообрабатываемых материалов: дисс. док. тех. наук: 05.02.07 / Рябцев Сергей Александрович – Москва, 2011. – 387 с.

124. **Рябцев, С. А., Нецик Р. А.** Глубинное шлифование сложнофасонных поверхностей деталей с большими площадями обработки // Сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмические технологии и образование на рубеже веков». – Рыбинск: РГАТА, 2002. – С. 31.

125. **Самарин, Ю. П.** Технологическое обеспечение точности фасонных поверхностей при шлифовании и финишной абразивной обработке. / Ю.П. Самарин, А. Н. Филин, В. Г. Рахчеев. – М.: Машиностроение, 1999. – 300 с.

126. **Силин, С. С.** Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С. С. Силин, В. А. Хрульков, А. В. Лобанов, Н. С. Рыкунов. – М.: Машиностроение, 1984. – 64 с.

127. **Силин, С. С.** Оптимизация технологии глубинного шлифования / С. С. Силин, Б. Н. Леонов, В. А. Хрульков и др.; Редкол.: П. Н. Орлов. – М.: Машиностроение, 1989. – 120 с.

128. **Солер, Я. И.** Выбор абразивных кругов по прижогам закаленных деталей с использованием цифровых технологий / Я. И. Солер, Д. Ю. Казимиров, В. Л. Нгуен // Вектор науки ТГУ, 2015. – № 2. – С. 176-184.

129. **Спиридонов, А. А.** Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. - М.: Машиностроение, 1981. –184 с.

130. Старков, В. К. и др. Сравнительные испытания высокопористых шлифовальных кругов различных производителей при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток // Вестник МГТУ «Станкин». – М.: МГТУ «Станкин», 2010. №3. – С. 18-22.

131. **Старков, В. К.** Повышение эффективности процессов глубинного шлифования / В. К. Старков, С. А. Рябцев, Н. А. Горин; Под ред. В. К. Старкова. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2012. – 117 с.

132. **Старков, В. К.** Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.

133. **Старков, В. К.** Шлифование цементованных и закаленных сталей высокоструктурными кругами / Старков, В. К., Белоусова Н.И. // Авиационная промышленность. 1972, №6. – С. 44-47.

134. **Старкова, В. К.** Высокоструктурные шлифовальные круги и их эффективное применение / В.К. Старков, С.А. Рябцев, А. Н. Довгаль, Т.П. Бондарчук; Под ред. В. К. Старкова. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2013. – 215 с.

135. **Старкова, В. К.** Высокоэффективные технологии шлифования фасонных поверхностей / В.К. Старков, С.А. Рябцев, Л.С. Петросян // Вестник МГТУ «Станкин». – М.: МГТУ «Станкин», 2008. №2. – С. 19-23.

136. **Сулима, А. М.** Основы технологии производства газотурбинных двигателей: Учеб. для вузов по специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки». / А. М. Сулима, А. А. Носков, Г. З. Серебренников. – М.: Машиностроение, 1996. – 479 с.

137. **Суслов, А. Г.** Инженерия поверхности деталей. / А. Г. Суслов и др. – М.: машиностроение, 2008. – 320 с.

138. **Суслов, А. Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. / А.Г.Суслов – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.

139. **Суслов, А. Г.** Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.

140. **Суслов, А. Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. / А. Г. Суслов – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.

141. Технологическое обеспечение проектирования и производства газотурбинных двигателей. / Б. Н. Леонов, А. С. Новиков, Е. Н. Богомолов, Л. Б. Уваров, Е. А. Антонов, А. А. Жуков, под ред. Б. Н. Леонова, А. С. Новикова. – Рыбинск, 2000. – 406 с.

142. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей / Елисеев Ю. С., Бойцов А. Г., Крымов В. В. и др. // М.: Машиностроение, 2003. – 511 с.

143. **Тимофеев, М. В.** Определение технологических условий шлифования деталей ГТД с учетом структурных и фазовых изменений в их поверхностном слое: дисс. канд. техн. наук: 05.02.08 / М. В. Тимофеев – Рыбинск, 2007.

144. Управление процессом шлифования / А. В. Якимов, А. Н. Паршаков, В. И. Свириденко, В. П. Ларшин. – К.: Техника, 1983. – 184 с.

145. **Ферстер, Э.** Методы корреляционного и регрессионного анализа / Э. Фёрстер, Б. Рёнц. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 302 с.

146. **Цветков, Е. В.** Актуальность многокоординатного глубинного шлифования / XXXIV Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции. В 8-ми т. – Москва: МАТИ-РГТУ, 2008. – Т.6. – С. 78-80.

147. **Цветков, Е. В.** Обработка хвостовиков компрессорных лопаток из титановых сплавов методом глубинного шлифования / Е. В. Цветков, Д. В. Зиновьев // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П.А. Соловьева: Сборник научных трудов. – Рыбинск, 2008. – №1(13). – С. 104-109.

148. **Цветков, Е. В.** Перспективная обработка секторов соплового аппарата / Всероссийская научно-техническая конференция молодых специалистов, посвященная 83-й годовщине образования ОАО «УМПО»: сборник материалов. – Уфа: УГАТУ, 2008. – Ч.1. – С. 15-16.

149. **Цветков, Е. В.** Повышение производительности обработки криволинейных поверхностей блоков сопловых лопаток при многокоординатном

глубинном шлифовании: дисс. канд. техн. наук: 05.02.07 / Цветков Егор Викторович – Рыбинск, 2010. – 197 с.

150. **Цветков, Е. В.** Технологические возможности оборудования для многокоординатной обработки секторов соплового аппарата методом глубинного шлифования / Справочник. Инженерный журнал, г. Москва, 4 / 2009 г. / под редакцией Волкова Д.И., 2009. – №4. – С. 6-11.

151. **Юсупов, Г. Х.** Производительное алмазное шлифование: монография / Г. Х. Юсупов, С. А. Колегов, Т. Ю. Пузырева. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 228 с.

152. **Якимов, А. В.** Управление процессом шлифования. / А. В. Якимов - Киев, 1983. – 290 с.

153. **Якимов, А. В.** Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / А.В. Якимов – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.

154. **Якимов, А. В.** Оптимизация процесса шлифования. / А. В. Якимов - М. : Машиностроение, 1975. – 176 с.

155. Current Global Research Projects in Fixed Abrasive Grinding. / Dr. John A. Webster., Cool-Grind Technologies., USA, – 2005.

156. **Denkena, B.** Process Machine Interactions: Prediction and Manipulation of Inter-actions between Manufacturing Processes and Machine Tool Structures. / Denkena, B., Hollmann F. (Eds.) // Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2013. – XVIII, – 518 p.

157. Fritz Klocke [et al.]. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites. CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2015.

158. High performance 5-axis measurement. A measurement revolution – RENISHAW. Issued 1011 Part no. H-1000-0050-01-A. – 2011.

159. **Hoffmeister H.** Schleifen schwer zerspanbarer Werkstoffe mit CD (Continuous Dressing) // Jahrb. Schleifen, Honen, Lappen und Polieren: Verfahren und Masch. 58 Ausg. – Essen, 1997. – P. 372-390.

160. **Konig, W.** High Speed Grinding with CBN Wheels / Konig, W., Klocke, F. and Stuff, D. // Boundary Conditions, Applications and Prospects of a Future Oriented Technology, 1st French and German Conf. on High Speed Machining, Metz, June, 1997. – P. 207-218.
161. Ling Tianbai Analysis and Research on Development Trend of High-end CNC Grinding Machine / Ling Tianbai, He Yongyi. // 3rd International Conference on Machinery, Materials and Information Technology Applications (ICMMITA 2015), China. – P.1341-1347.
162. **Marinescu, J.** Handbook of Machining with Grinding Wheels / J. Marinescu [et al.] // New York: CRC Press Taylor and Francis Group, 2007. – 596 p.
163. Performance of the Speed-Stroke and Creep-Feed Grinding under Constant Removal Rate. / A. Yui, S. Okuyama and T. Kitajima. // National Defense Academy, 1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka-City, 239-86-86, Japan. Key Engineering Materials., 2004. – Vols. 257-258, – P. 69-74.
164. **Tawakoli, T.** High Efficiency Deep Grinding. Chapter 1&2 / Mech. Eng. Publications Ltd., London, 1993 – 18 p.
165. **Wang, S.** Application and Development of High-efficiency Abrasive Process / Wang, S., Li C. H. // International Journal of Advanced Science and Technology, 2012. – Vol. 47. – P. 51-64.
166. **Werner, G.** Realisierung niedriger Werkstück Oberflächentemperaturen durch den Einsatz des Tief-schleifens; Trenn-Kompendium, ELF-Verlag, Bergisch-Gladbach, – 1983. – Vol. 2, – P. 448-468.
167. **Werner, G.** Technologische und Konstruktive Voraussetzungen für das Tiefschleifen / G. Werner. – «Werkstattstechnik», 1979. – Vol. 10. – P. 613-620.
168. **Zhang Bi.** Machining vs. Grinding. Towards High Efficiency Machining. Presentation. University of Connecticut. Mechanical Engineering. – 2010.

Приложение 1

Акт об использовании результатов диссертационной работы
в производственной деятельности

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель управляющего
директора - директор опытного
завода АО «ОДК-Авиадвигатель»

Н.Н. Черкашнев
2025 г.

В диссертационный совет

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Норина Александра Олеговича
«Повышение производительности и точности изготовления сопловых аппаратов за
счет корректирующего шлифования контактных поверхностей лопаток,
сориентированных по площади проходного сечения» в производство.

Акт составлен в том, что в 2017 году на предприятие АО «ОДК-Авиадвигатель»
внедрены следующие результаты диссертационной работы аспиранта кафедры
«Инновационные технологии машиностроения», ПНИПУ Норина Александра
Олеговича «Повышение производительности и точности изготовления сопловых
аппаратов за счет корректирующего шлифования контактных поверхностей лопаток,
сориентированных по площади проходного сечения», выполненной под
руководством доктора технических наук, профессора Макарова В.Ф.

Внедрение новой технологии обработки сопловых лопаток турбины
газотурбинного двигателя на пятиосевом профилешлифовальном центре с ЧПУ
MFP-050.65.65 фирмы «Mägerle» позволило обеспечить повышение
производительности обработки сопловых лопаток на 45% и сократить время сборки
сопловых аппаратов турбин в 1,5-2 раза за счёт гарантированного обеспечения
площади проходного сечения соплового аппарата после сборки с первого раза, а
также исключения возвратов сопловых аппаратов со сборки.

За время применения новой технологии обработки сопловых лопаток на
пятиосевом профилешлифовальном центре с ЧПУ MFP-050.65.65 фирмы «Mägerle»
было обработано – 40 комплектов.

Начальник АСТПП

С.А. Червонных

Главный инженер

А.И. Пермяков




Приложение 2

Акт об использовании результатов диссертационной работы
в производственной деятельности

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер АО «ОДК-ПМ»
В.Т. Хайрулин
« 10 / 10 / 2025 г.
М.П.
В диссертационный совет
ОДК-Пермский
моторы

АКТ

передачи результатов диссертационной работы Норина Александра Олеговича «Повышение производительности и точности изготовления сопловых аппаратов за счет корректирующего шлифования контактных поверхностей лопаток, сориентированных по площади проходного сечения» для внедрения в производство.

Акт составлен в том, что на предприятие АО «ОДК-ПМ» переданы следующие результаты диссертационной работы аспиранта кафедры «Инновационные технологии машиностроения», ПНИПУ Норина Александра Олеговича «Повышение производительности и точности изготовления сопловых аппаратов турбин путем применения корректирующего глубинного шлифования сопловых лопаток на многоосевом станке с ЧПУ», выполненной под руководством доктора технических наук, профессора Макарова В.Ф.

Внедрение предлагаемой новой технологии обработки сопловых лопаток турбины газотурбинного двигателя на пятиосевом профилешлифовальном центре фирмы «Mägerle» позволит обеспечить площадь проходного сечения соплового аппарата после сборки в узел.

Главный технолог – начальник управления



И.П. Середоха

Заместитель начальника отдела
по технологическому сопровождению



В.Н. Щукин

Приложение 3

**Акт об использовании результатов диссертационной работы
в учебном процессе**

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям
Пермского национального
исследовательского
политехнического университета,
докцент, доктор физико-
математических наук

А.И. Швейкин

» 10 июля 2025 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования

Настоящий акт составлен в том, что материалы диссертационного исследования Норина А.О. «Повышение производительности и точности изготовления сопловых аппаратов за счет корректирующего шлифования контактных поверхностей лопаток, сориентированных по площади проходного сечения», научный руководитель д.т.н., профессор Макаров В.Ф., используются в ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский университет» в учебном процессе на кафедре «Инновационные технологии машиностроения» по направлениям подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» при проведении дисциплин «Резание материалов» и «Технология машиностроения», профиль «Технологии цифрового проектирования и производства в машиностроении», 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», профиль «Технология машиностроения инновационного производства» при проведении дисциплины «Высокоэффективные методы резания материалов».

Заведующий кафедрой ИТМ,
д.т.н., профессор

В.В. Карманов

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2648174

**СПОСОБ ОБРАБОТКИ РАДИАЛЬНОЙ ТОРЦЕВОЙ
КАНАВКИ НА ДЕТАЛИ ГАЗОТУРБИННОГО
ДВИГАТЕЛЯ (ВАРИАНТЫ)**

Патентообладатель: *Акционерное общество "ОДК-Авиадвигатель"*
(RU)

Авторы: *Кобелев Сергей Викторович (RU), Тукачев Дмитрий
Валерьевич (RU), Норин Александр Олегович (RU)*

Заявка № 2017119813
Приоритет изобретения 06 июня 2017 г.
Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 22 марта 2018 г.
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 06 июня 2037 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Излиев Г.П. Излиев