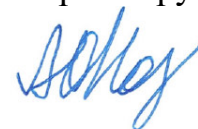


На правах рукописи



Норин Александр Олегович

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

2.5.6. Технология машиностроения
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Волгоград – 2026

Работа выполнена на кафедре «Инновационные технологии машиностроения» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор,
МАКАРОВ Владимир Фёдорович.

Официальные оппоненты:

ВОЛКОВ Дмитрий Иванович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Рыбинский
государственный авиационный
технический университет имени П. А.
Соловьева», кафедра «Инновационного
машиностроения», профессор.

КИСЕЛЕВ Евгений Степанович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Ульяновский
государственный технический
университет», кафедра «Инновационные
технологии в машиностроении»,
профессор.

Ведущая организация

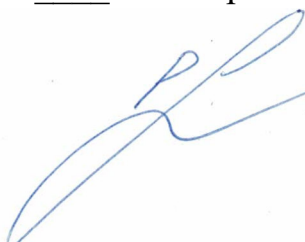
ФГБОУ ВО «Южно-Уральский
государственный университет
(Национальный исследовательский
университет)», г. Челябинск.

Защита состоится «03» декабря 2026 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 99.2.072.02, созданного на базе Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А. и Волгоградского государственного технического университета по адресу: 400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, д. 28, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» и на сайте <https://www.vstu.ru> по ссылке <https://www.vstu.ru/upload/iblock/791/7915cad3ded38bc327811fa1215a3f78.pdf>

Автореферат разослан «___» октября 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Родионов Игорь Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В связи с вводом в эксплуатацию новых типов отечественных магистральных самолётов MC-21-310, Sukhoi Superjet 100 New, а также с ростом объёмов производства ТУ-214, необходимо увеличить объём выпускаемых отечественных газотурбинных двигателей ПД-14, ПД-8 и ПС-90А.

Установлено, что одной из проблем, сдерживающих производство и сборку газотурбинных двигателей на предприятиях моторостроения, является проблема низкой производительности и точности изготовления сопловых лопаток турбин, а также высокая трудоёмкость сборки из этих лопаток сопловых аппаратов турбин. Анализ проблем показал, что при обработке поверхностей сопловой лопатки используют широкую номенклатуру низкопроизводительных шлифовальных и модернизированных токарно-лобовых станков с большим числом установочных приспособлений и частой переустановкой лопаток при её обработке. Другая актуальная проблема – это отклонение геометрии профиля пера сопловых лопаток от конструкторской геометрии, которое проявляется в процессе литья лопаток. В результате при сборке таких сопловых лопаток в сопловой аппарат (СА) не обеспечивается необходимая площадь проходного сечения соплового аппарата (ППС СА). В связи с этим возникает необходимость в изготовлении дополнительных лопаток и в их селективной переборке.

Предлагается решить эти проблемы за счёт использования технических возможностей современного автоматизированного многоосевого шлифовального станка с ЧПУ, который обеспечит высокую производительность, качество обработки сопловых лопаток, а также позволит по результатам бесконтактного оптического контроля скорректировать положения пера лопатки при глубинном шлифовании установочных поверхностей лопатки. Данное решение позволяет уменьшить отклонения профиля пера лопатки, полученного при литье, и обеспечить требуемую общую ППС СА после сборки в узел.

Анализ литературы и опыта предприятий показал, что рассмотренные проблемы остаются нерешёнными как в производстве, так и в научном плане.

Поэтому создание нового технологического процесса, который обеспечит повышение производительности и точности изготовления сопловых лопаток, а также обеспечит сборку сопловых аппаратов с требуемым значением площади проходного сечения соплового аппарата, является весьма актуальной. 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., Крылов В.И., Леонов Б.И., Хрульков В.А.,

Прокофьев М.А. и др. Разработкой новых шлифовальных кругов и область их применения занимались: Старков В.К., Бакуль В.Н., Ваксер Д.Б., Воронин В.Н. 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 была рассмотрена проблема комплексного обеспечения точности как отдельной сопловой лопатки, так и соплового аппарата в целом после сборки.

Целью работы является повышение производительности и точности изготовления сопловых аппаратов за счёт новой технологии корректирующего шлифования.

Задачи работы.

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;
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.

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 профишлифовальный 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, определяющая мнимую 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», (АКТТИ – 2015), г. Пермь, 17 по 18 ноября 2015 г., VIII Международная научно-техническая конференция: «Наукоёмкие технологии на современном этапе развития машиностроения», 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», г. Рыбинск, 20-22 сентября 2016 г., Современные высокоэффективные технологии и оборудование в машиностроении (МТЕТ-2016): труды международной научно-технической конференции, г. Санкт-Петербург, 6-8 октября 2016 г., XXIV Всероссийская научно-техническая конференция «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2023» (АКТТИ – 2023), г. Пермь, 15-17 ноября 2023 г, XII Всероссийская научно-техническая конференция «Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста», 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 146 страницах машинописного текста, имеет 75 рисунков, 9 таблиц, 1 формулу. Список использованных источников включает 168 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, представлены методы исследования, сформулированы цели, задачи исследований и научная новизна, практическая значимость.

В первой главе выполнен анализ состояния вопроса, выявлены проблемы и установлены пути решения по повышению производительности, качества изготовления и сборки сопловых аппаратов турбин с требуемыми характеристиками. Установлены причины высокой трудоёмкости изготовления сопловых лопаток, процесса сборки и контроля сопловых аппаратов. Указаны причины возникновения основных погрешностей, влияющих на ППС СА, проанализированы особенности формирования установочных поверхностей сопловых лопаток турбин. Рассмотрены современные направления развития процесса, автоматизированного профильного глубинного шлифования на многоосевых станках с ЧПУ.

В результате анализа технологии обработки сопловых лопаток установлено, что большая трудоёмкость изготовления лопаток связана с тем, что шлифование различных поверхностей лопатки выполняется на большой номенклатуре различных шлифовальных станков типа ЛШ-220 и 3Г71. Обработка ведётся в специальных стапелях на модифицированных токарно-лобовых станках типа МК-163М с применением шлифовальных кругов на керамической и бакелитовой связке, часто обработка выполняется без СОЖ. В результате такой обработки сопловых лопаток растёт трудоёмкость и снижается их точность.

Кроме того, установлено, что в процессе литья проточная часть и профиль пера отлитых сопловых лопаток очень часто (до 40-50%) имеют локальные отклонения геометрии свыше $\pm 0,3$ мм от заданной конструкторской геометрии, что не позволяет обеспечить сборку с требуемой общей ППС СА с первого раза от технологических баз. Требуется выполнить 2-3 переборки соплового аппарата, чтобы обеспечить общую ППС СА в заданном допуске.

На основании обработки статистических данных отклонений пера сопловых лопаток после литья установлено, что в процессе сборки таких лопаток не обеспечивается общая ППС СА для 95% комплектов сопловых лопаток. Поэтому необходимо разработать методику и выполнить корректирующие действия, чтобы уменьшить отклонения геометрии пера сопловых лопаток в процессе их изготовления. Это позволит обеспечить общую площадь проходного сечения соплового аппарата при его сборке.

Проведённый анализ научных работ показал, что для решения данных проблем необходимо использовать современный автоматизированный

многоосевой шлифовальный станок с ЧПУ. А для контроля сопловых лопаток и собранного соплового аппарата рекомендуется использовать оптический метод.

Сделаны выводы из проведённого литературного обзора, сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена обоснованию разработки и применения новой технологии обработки сопловых лопаток и сборки сопловых аппаратов ГТД.

В ходе предварительных исследований установлено, что для уменьшения величины отклонения геометрии пера лопатки от конструкторской модели необходимо выполнить разворот сопловой лопатки вокруг своей оси на определённый угол.

Выдвинута гипотеза, что корректировка отклонений геометрии профиля пера отлитых сопловых лопаток и обеспечение общей ППС СА возможно

реализовать за счёт применения бесконтактного оптического метода контроля реальной геометрии пера лопатки, СПО и обработки лопаток на многоосевом станке с ЧПУ. Для этого необходимо рассчитать угол разворота и выполнить корректирующее глубинное шлифование установочных поверхностей сопловой лопатки на многоосевом шлифовальном станке с ЧПУ.

Увеличение производительности обработки установочных поверхностей лопатки, а также повышение точности и улучшение качества поверхностного слоя достигаются за счёт применения современного многоосевого шлифовального станка с ЧПУ. Корректирование отклонения профиля пера лопатки выполняется за счёт разворота лопатки вместе с приспособлением на расчётный угол (γ) (рисунок 1, а, б), для этого используется наклонно-поворотный стол станка с ЧПУ. Затем выполняется съём припуска (Пр) на установочных поверхностях сопловой лопатки.

Для расчёта угла разворота сопловой лопатки, необходимого для

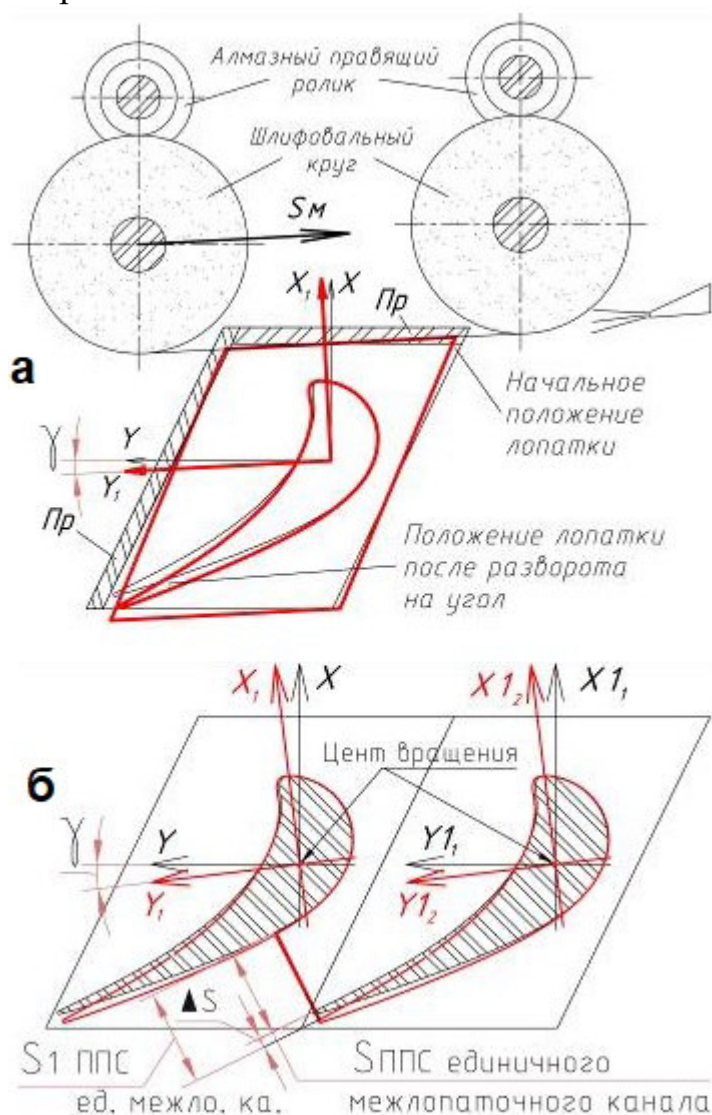


Рисунок 1 Схема разворота лопатки при корректирующем глубинном шлифовании на многоосевом шлифовальном станке с ЧПУ:

а – принцип обработки установочных поверхностей, б – схема расчёта ППС межлопаточного канала.

обеспечения общей ППС СА в середину поля допуска разработано СПО, которое по данным оптического контроля фактического профиля пера лопатки рассчитывает усреднённый угол разворота (γ) для всех лопаток, входящих в комплект соплового аппарата (рисунок 1, а, б). При расчёте угла разворота (γ) учитывается фактический припуск (Пр) на установочных поверхностях лопатки, который обычно составляет от 1 до 1,5 мм. Затем СПО рассчитывает файл для станка с ЧПУ, который содержит смещения и углы разворота лопатки вместе с приспособлением. Обработка установочных поверхностей всех сопловых лопаток, входящих в комплект соплового аппарата, выполняется с данным файлом на многоосевом шлифовальном станке с ЧПУ.

На основании анализа статистических данных проведён расчёт и получена эмпирическая линейная регрессионная зависимость (1) изменения общей ППС СА 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, тем самым обеспечить необходимую общую ППС СА.

$$S_{\text{общ. ППС СА}} = 151,67\gamma + 42121, \text{ мм}^2 \quad (1)$$

Разработанная линейная регрессионная зависимость 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 пятиосевой шлифовальный станок с ЧПУ с наклонно-поворотным столом.

На рисунке 2 представлен график линейной регрессионной зависимости ППС СА от угла разворота сопловой лопатки вокруг виртуальной оси лопатки.

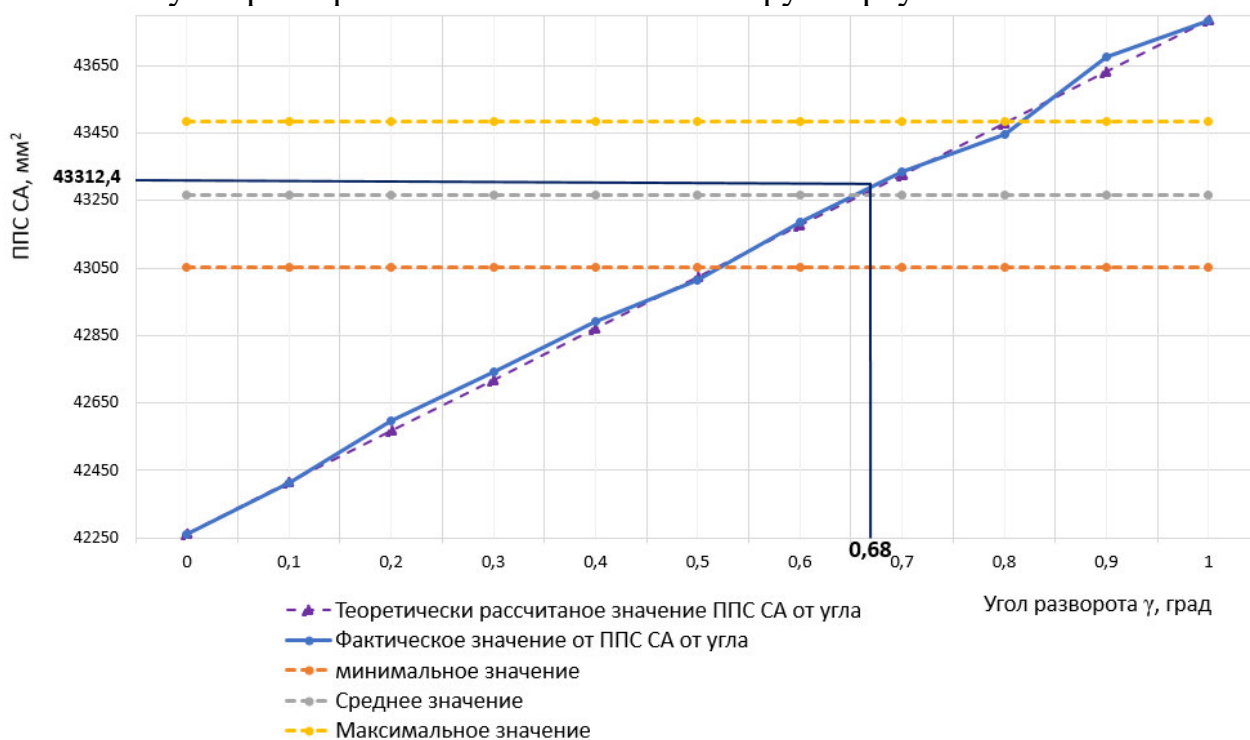


Рисунок 2 График зависимости ППС СА от угла разворота сопловой лопатки вокруг своей оси

Данная регрессионная зависимость используется в СПО для расчёта рационального угла разворота путём последовательного итерационного перебора с обеспечением общей ППС СА в середину заданного поля допуска.

Для реализации выдвинутой гипотезы разработано СПО, связывающее отдельные этапы нового технологического процесса. Алгоритм и этапы технологического процесса приведены на рисунке 3.

Разработанный алгоритм технологического процесса предусматривает следующие четыре основных этапа:

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

В этот этап входят все виды осмотра, ЛЮМ-контроль, оцифровка и сравнение геометрии пера лопатки с конструкторской моделью (рисунок 4, а). Затем выполняется передача комплекта сопловых лопаток в цех для механической обработки.

2. Передача полученных данных фактической геометрии пера в СПО с заданием начальных данных и ограничений, которые необходимо учитывать при выполнении расчёта.

На этом этапе в СПО задаются необходимые параметры, такие как требуемая общая ППС СА, количество лопаток в СА и величина припуска на установочных поверхностях лопатки. После этого выполняется расчёт общей ППС СА для лопаток, полученных после литья. Если расчётная ППС СА не соответствует заданному значению, то в СПО рассчитывается необходимый угол разворота (γ) для всего комплекта лопаток методом итерационного перебора.

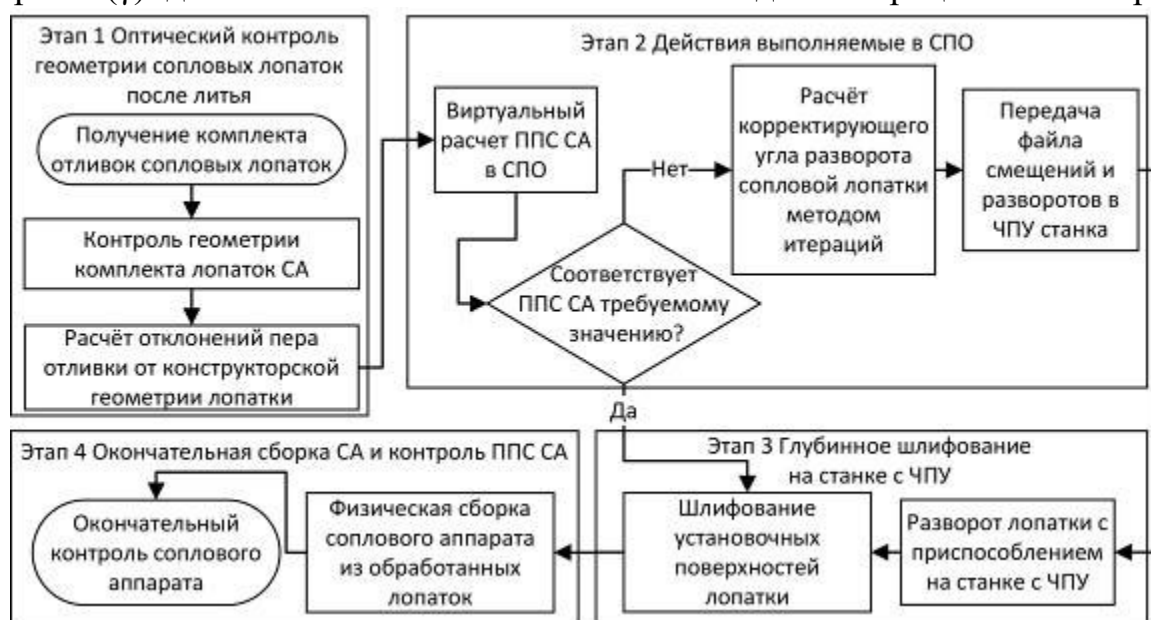


Рисунок 3 Блок-схема алгоритма и этапы разработанного технологического процесса изготовления сопловых лопаток и сборки соплового аппарата

При расчёте угла СПО учитывает величину фактического припуска на установочных поверхностях лопатки, обеспечивая наличие припуска на установочных поверхностях после разворота и обработки лопатки. После выполнения разворота фактическая геометрия пера лопатки приближается к

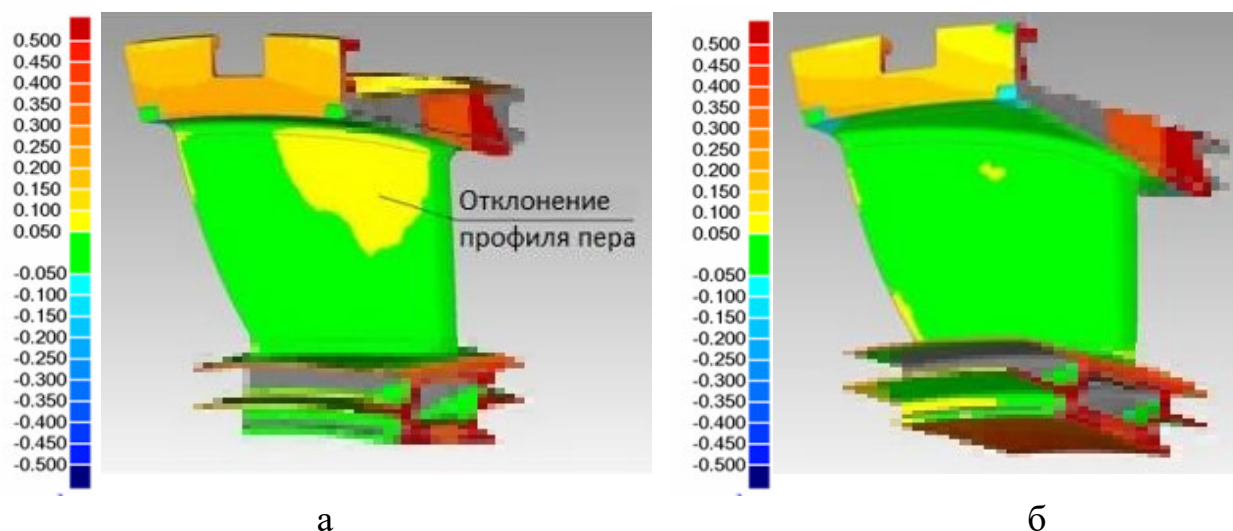


Рисунок 4 Результаты оптического контроля отклонений геометрии пера лопатки от конструкторской геометрической модели: а - после литья (без разворота), б - после разворота конструкторской геометрии (рисунок 4, б). Затем снова выполняется виртуальная сборка СА и рассчитывается общая ППС СА. Далее СПО создаёт файл, содержащий смещения и углы разворота приспособления вместе с установленной лопаткой. Данный файл передаётся в стойку многоосевого шлифовального станка с ЧПУ для выполнения обработки.

3. Обработка лопатки на многоосевом шлифовальном станке с ЧПУ.

На данном этапе сопловая лопатка устанавливается в приспособление, после чего происходит её фактический разворот на расчётный угол (γ) вместе с приспособлением. Разворот лопатки осуществляется за счёт наклонно-поворотного стола станка, который управляется стойкой станка с ЧПУ. Затем выполняется корректирующее глубинное шлифование установочных поверхностей лопатки. После завершения обработки всех сопловых лопаток выполняется реальная сборка лопаток в СА. После сборки выполняется оптический контроль фактически полученной общей ППС СА.

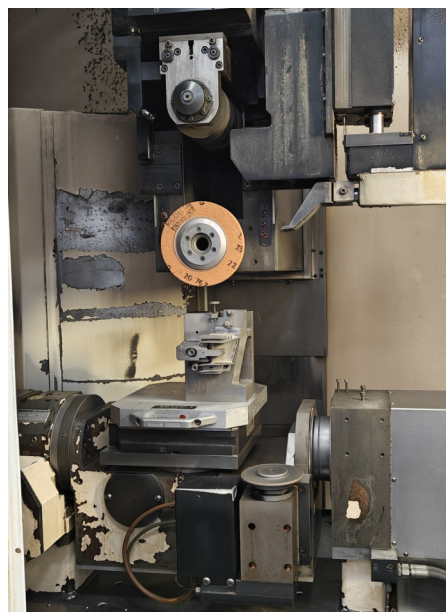


Рисунок 5 Внешний вид лопатки, приспособления и шлифовального станка с ЧПУ

Определены рациональные режимы резания, которые обеспечили высокую производительность и безприжоговое шлифование поверхностей лопатки с необходимой шероховатостью $Ra=1,25$ мкм. Используемые режимы резания при обработке лопатке: скорость круга $V=20$ м/с, подача $S_{мин.}=150-200$ мм/мин, непрерывная правка $0,8$ мкм/об., подача СОЖ 6-8% Blaser 4000CF под давлением 6 бар. Обработка поверхностей лопатки выполняется высокопористыми шлифовальными кругами в сочетании с непрерывной правкой и поливом СОЖ под высоким давлением (рисунок 5), что позволяет обрабатывать на данных режимах припуск от 1 до 1,5 мм за 5 проходов с уменьшением глубины

резания от 1 до 0,02 мм за один проход. Для проверки гипотезы и эффективности нового технологического процесса необходимо выполнить экспериментальные исследования новой технологии обработки сопловых лопаток и сборки СА.

В третьей главе разработана методика экспериментальных исследований новой технологии повышения производительности и точности изготовления сопловых лопаток и сборки СА.

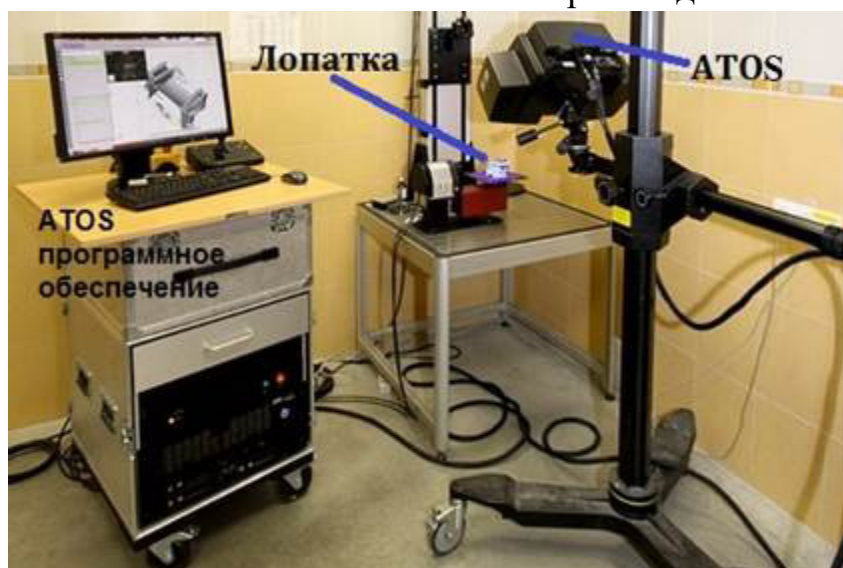


Рисунок 6 Внешний вид оптической измерительной системы ATOS

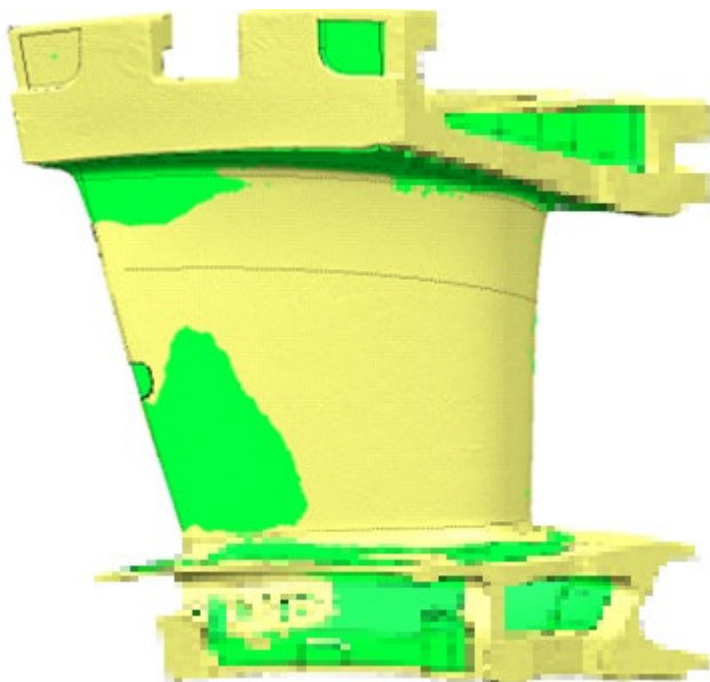


Рисунок 7 Оцифрованная модель лопатки, совмещённая с конструкторской моделью: а – зелёным цветом окрашена геометрическая модель лопатки, б – светло-жёлтым цветом окрашена оцифрованная модель лопатки, полученная с помощью ATOS

Для исследований выбран пятиосевой профилировальный станок с ЧПУ MFP-050.65.65 фирмы Mägerle (Швейцария), который обладает наклонно-поворотным столом и позволяет осуществлять разворот сопловой лопатки на требуемый угол (γ) вместе с приспособлением. Система ЧПУ Sinumerik 840sl шлифовального станка позволяет использовать дополнительный файл, полученный в стороннем ПО для разворота лопатки на требуемый угол.

Для глубинного шлифования установочных поверхностей сопловой лопатки выбраны отечественные высокопористые керамические шлифовальные круги фирмы ООО «Волгашлиф Плюс» 1 300x30x76,2 25A F60 G14 V, 35 м/с. Станок оснащён инструментальным магазином для автоматической смены кругов, что позволяет

обрабатывать различные поверхности лопатки за один установ.

Измерения лопатки выполняли с помощью оптической координатно-измерительной топометрической системы ATOS III (рисунок 6). Данная система позволяет контролировать все геометрические поверхности сопловой лопатки. Система ATOS в связке с программным обеспечением создаёт оцифрованную модель фактической геометрии сопловой лопатки в формате STL (рисунок 7). Точность измерения оцифрованной геометрии сопловой лопатки составляет $\pm 0,02$ мм.

Для оценки эффективности работы нового технологического процесса и проверки корректности работы СПО выполнили оцифровку лопаток до начала её обработки на станке с ЧПУ. Полученную оцифрованную модель лопатки совместили с конструкторской моделью методом наилучшего совмещения «best fit» по шести литым точкам K1-K6. СПО позволяет выполнить виртуальную сборку соплового аппарата из оцифрованных моделей лопаток и рассчитать общую теоретическую площадь проходного сечения соплового аппарата до обработки на станке с ЧПУ. Чаще всего площадь проходного сечения соплового аппарата не соответствует требуемому значению, указанному в конструкторской документации.

С помощью СПО выполняется виртуальный разворот всех лопаток в виртуально собранном сопловом аппарате, после чего повторно выполняется расчёт площади проходного сечения. СПО рассчитывает необходимый единый угол разворота лопатки вокруг своей оси для всего комплекта лопаток. Расчёт необходимого угла разворота выполняется до достижения требуемого значения общей площади проходного сечения соплового аппарата в пределах заданного допуска. СПО также рассчитывает смещения и углы разворота сопловой лопатки для пятиосевого шлифовального станка с ЧПУ. Данный файл позволяет дополнительно развернуть лопатку на расчётный угол вокруг оси лопатки за счёт наклонно-поворотного стола станка с ЧПУ. Файл содержит дополнительные смещения лопатки по осям X, Y, Z и повороты лопатки вокруг осей A, B, C станка. На шлифовальном станке с ЧПУ выполняется обработка установочных поверхностей одной сопловой лопатки с применением данного файла смещений.

Установочные поверхности сопловой лопатки определяют осевое, радиальное и угловое положение лопатки в сопловом аппарате, а также пространственное расположение пера, верхней и нижней полки лопатки в сопловом аппарате. После обработки всех лопаток из одного комплекта на шлифовальном станке с ЧПУ выполняется их оцифровка. Полученные оцифрованные модели лопаток привязываются к конструкторской модели методом наилучшего совмещения по установочным поверхностям лопатки, которые определяют положение лопатки в сопловом аппарате. Данными поверхностями являются радиус, торец и паз, который отвечает за угловое положение лопатки.

С помощью СПО выполняется виртуальная сборка соплового аппарата из оцифрованных моделей лопаток после их обработки на станке с ЧПУ. Базирование лопаток в виртуальной сборке выполняется по установочным поверхностям лопатки. Затем выполняется виртуальная проверка получившейся

общей площади проходного сечения соплового аппарата.

Четвёртая глава содержит 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 сопловых лопаток в количестве 38 шт. входящих в состав соплового аппарата. Результаты измерений на ATOS и расчётов в СПО представлены в таблицах 1 и 2.

Результаты сравнения оцифрованных моделей отливок с конструкторской геометрической моделью и виртуальной оценки межлопаточной площади проходного сечения единичного канала и общей площади проходного сечения соплового аппарата представлены в таблице 1.

Таблица 1 Площадь проходного сечения соплового аппарата для межлопаточного канала, рассчитанная с помощью СПО на основе данных оптического контроля отлитых лопаток без угла разворота

Единичный межлопаточный канал для пары рядом стоящих лопаток	Площадь проходного сечения межлопаточного канала для лопаток, полученных после литья S_1 , мм ²	Отклонение от номинального значения 1138,62 мм ²	Индивидуальный угол разворота для каждой лопатки γ , град.
Меж. канал 1	1138,62	-2,11	0,23
Меж. канал 2	1125,41	-13,21	1
...	...	...	...
Меж. канал 37	1137,35	-1,27	0,16
Меж. канал 38	1133,58	-5,04	0,45
Итого:	$S_{1 \text{ среднее}} = 1132,64$	$\Delta S_{1 \text{ среднее}} = -5,98$	$\gamma_{\text{среднее значение}} = 0,68$

В результате анализа данных, представленных в таблице 1, сделаны следующие выводы:

– площадь проходного сечения единичного межлопаточного канала S_1 для пары лопаток без угла разворота, рассчитанная для комплекта из 38 лопаток, варьируется в диапазоне от 1121,06 до 1144,24 мм². Среднее значение площади проходного сечения межлопаточного канала составило $S_{1 \text{ среднее}} = 1132,64$ мм², что на 0,29 мм² меньше 1132,93 мм², чем указано в конструкторской документации ($1138,62 \pm 5,69$ мм², диапазон от 1132,93 до 1144,31 мм²).

– среднее отклонение площади проходного сечения единичного межлопаточного канала составляет $\Delta S_{1 \text{ среднее}} = 5,98$ мм², что превышает допустимое значение допуска 5,69 мм² на 0,29 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.

По результатам расчёта получена площадь проходного сечения для каждого единичного межлопаточного канала в сопловом аппарате и общая ППС СА для комплекта лопаток, полученных после литья, комплекта лопаток, виртуально

развёрнутых на расчётный угол, и комплекта лопаток, фактически обработанных на шлифовальном станке с ЧПУ, составлена таблица 2.

Таблица 2 Площадь проходного сечения единичного межлопаточного канала для пары сопловых 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 разво. 0,68 град.	$\Delta S_2, \text{мм}^2$ Отклонение от 1138,62 мм ²	$S_3, \text{мм}^2$ Фактическая площадь после корре. шлифования	$\Delta S_3, \text{мм}^2$ Отклонение от 1138,62 мм ²
Меж. канал 1	1136,51	-2,11	1138,51	-0,11	1136,37	-2,25
Меж. канал 2	1125,41	-13,21	1137,41	-1,21	1143,07	4,45
Меж. канал 3	1136,14	-2,48	1142,14	3,52	1143,86	5,24
Меж. канал 4	1123,38	-15,24	1143,38	4,76	1139,47	0,85
Меж. канал 5	1131,24	-7,38	1137,24	-1,38	1138,77	0,15
Меж. канал 6	1138,34	-0,28	1142,34	3,72	1147,08	8,46
....						
Меж. канал 38	1133,58	-5,04	1142,58	3,96	1147,58	8,96
Среднее значение	$S_{1\text{сред.}}=1132,64$	$\Delta S_{1\text{ср.}}=-5,98$	$S_{2\text{сред.}}=1139,80$	$\Delta S_{2\text{ср.}}=1,18$	$S_{3\text{сред.}}=1141,15$	$\Delta S_{3\text{ср.}}=2,53$
Общ. ППС СА:	$\Sigma S_1=43040,4$		$\Sigma S_2=43312,4$		$\Sigma S_3=43363,4$	

В результате анализа данных, представленных в таблице 2, сделаны следующие выводы:

– суммарная площадь проходного сечения отлитых лопаток без угла разворота составила $\Sigma S_1=43040,4 \text{ мм}^2$, что меньше нижнего значения допуска $43051,34 \text{ мм}^2$ на $10,94 \text{ мм}^2$. Это значит, что после сборки данных лопаток в сопловой аппарат не обеспечится общая площадь проходного сечения соплового аппарата;

– площадь проходного сечения единичного межлопаточного канала S_2 для пары лопаток после виртуального разворота, рассчитанная для комплекта из 38 лопаток, варьируется от $1126,73$ до $1154,24 \text{ мм}^2$. Среднее значение площади проходного сечения межлопаточного канала после виртуального разворота составило $S_{2\text{сред.}}=1139,80 \text{ мм}^2$, что соответствует допуску в конструкторской документации ($1138,62 \pm 5,69 \text{ мм}^2$, диапазон от $1132,93$ до $1144,31 \text{ мм}^2$);

– после виртуального разворота того же самого комплекта лопаток на расчётный угол общая ППС СА увеличилась с $\Sigma S_1=43040,1 \text{ мм}^2$ на 272 мм^2 и составила $\Sigma S_2=43312,4 \text{ мм}^2$. Общее значение площади превысило нижнее значение допуска $43051,3 \text{ мм}^2$ на $261,1 \text{ мм}^2$. Таким образом, общая площадь проходного сечения соплового аппарата оказалась выше середины поля допуска $43267,6 \text{ мм}^2$ на $44,8 \text{ мм}^2$;

– площадь проходного сечения единичного межлопаточного канала S_3 для пары лопаток после корректирующей шлифовки, рассчитанная для комплекта из 38 лопаток, варьируется от $1128,55$ до $1153,41 \text{ мм}^2$. Среднее значение площади проходного сечения межлопаточного канала после корректирующей шлифовки с заданным углом разворота составило $S_3=1141,15 \text{ мм}^2$, что соответствует допуску в

конструкторской документации ($1138,62 \pm 5,69$ мм², диапазон от 1132,93 до 1144,31 мм²);

– после корректирующей шлифовки установочных поверхностей лопатки с расчётным углом разворота на шлифовальном станке с ЧПУ для того же самого комплекта привело к тому, что фактически общая ППС СА увеличилась с $\sum S_1 = 43051,3$ мм² на 323,24 мм² и составила $\sum S_3 = 43363,64$ мм². Это значение превысило нижнюю границу допуска 43051,3 мм² на 312,3 мм². Таким образом, общая ППС СА оказалась выше середины поля допуска 43267,6 мм² на 96,1 мм²;

– в результате после сборки соплового аппарата суммарная ППС СА составила 43363,64 мм², что соответствует требуемому конструкторской документации диапазону значений от 43051,3 до 43483,8 мм².



Рисунок 8 Распределение площади проходного сечения единичного межлопаточного канала в виртуально собранном сопловом аппарате: S_1 – площадь литых лопаток без разворота, S_2 – виртуально рассчитанная площадь с учётом угла разворота, S_3 – фактическая площадь, полученная после корректирующей обработки на станке с ЧПУ

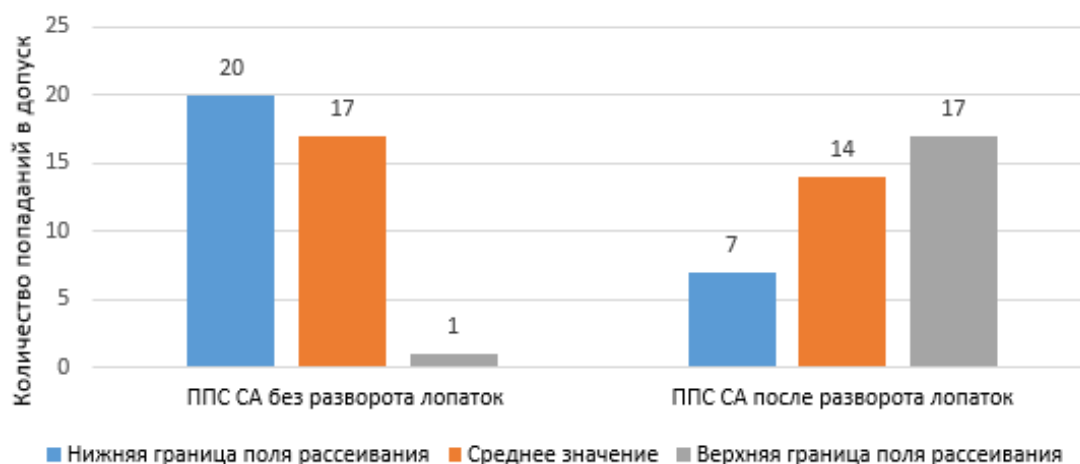


Рисунок 9 Распределение количества единичных межлопаточных каналов в сопловом аппарате в пределах поля допуска до и после разворота всех лопаток в одном комплекте

По результатам проведённых исследований построен график (рисунок 8 и 9). На графике (рисунок 8) 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.

Построен график (рисунок 9), 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.

Изменение площади проходного сечения единичного межлопаточного канала в собранном сопловом аппарате представлено на рисунке 8, где видно:

- линия S_1 показывает изменение площади проходного сечения для лопаток, полученных после литья, находится ниже минимального допустимого значения. Около 53% единичных межлопаточных каналов имеют площадь проходного сечения, находится ниже минимального значения допуска $1132,93 \text{ мм}^2$ (диапазон допуска от $1132,93$ до $1144,31 \text{ мм}^2$). А следовательно, у соплового аппарата, состоящего из данных лопаток, после сборки не обеспечится общая ППС СА;

- линия S_2 показывает изменение площади проходного сечения для виртуально развёрнутых лопаток на расчётный угол, видно, что 58% межлопаточных каналов соответствуют заданному допуску. Остальные значения находятся ниже 18% и выше 24% границ допуска ($1138,62 \pm 5,69 \text{ мм}^2$, диапазон допуска от $1132,93$ до $1144,31 \text{ мм}^2$), что позволяет обеспечить общую ППС СА после сборки;

- линия графика S_3 показывает изменение площади проходного сечения после корректирующего шлифования на станке с ЧПУ. Разброс значений площади проходного сечения стал больше, чем у виртуально развёрнутых лопаток. Только площадь 37% межлопаточных каналов соответствует заданному допуску ($1138,62 \pm 5,69 \text{ мм}^2$, диапазон допуска от $1132,93$ до $1144,31 \text{ мм}^2$), ещё 45% каналов, у которых значение площади превышает верхнее значение допуска ($1144,31 \text{ мм}^2$), а у остальных 18% каналов значения площади расположены ниже нижнего значения допуска ($1132,93 \text{ мм}^2$). Однако суммарное значение площадей единичных межлопаточных каналов позволяет обеспечить общую площадь проходного сечения соплового аппарата в середине поля допуска.

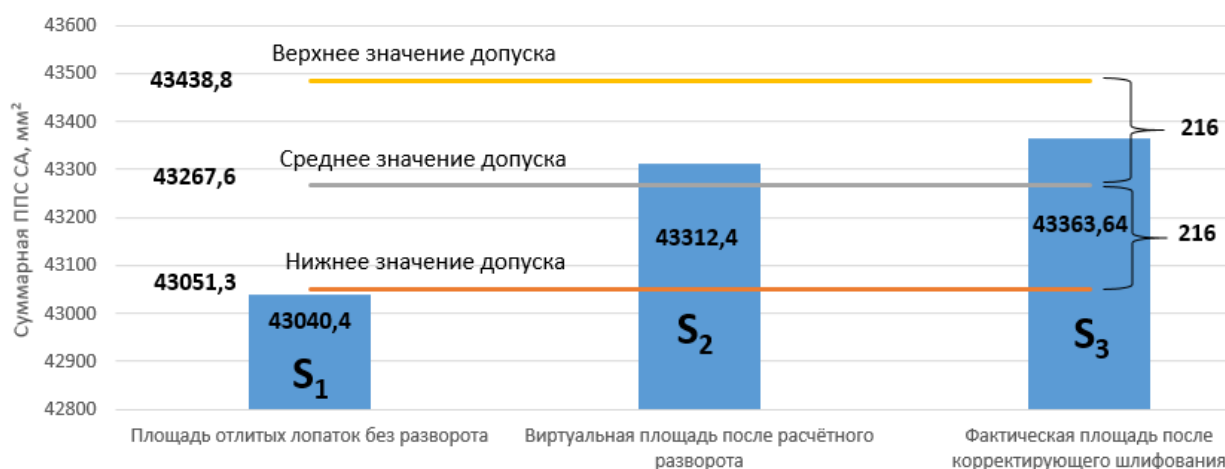


Рисунок 10 Суммарное значение площади проходного сечения соплового аппарата: после литья, виртуальный расчёт с углом разворота и фактическое значение площади после корректирующей обработки

Корректирующий разворот лопатки на расчётный угол позволил изменить площадь проходного сечения единичного межлопаточного канала и увеличил количество каналов, соответствующих допуску ($1138,62 \pm 5,69 \text{ мм}^2$) и превышающих верхнюю границу допуска ($1144,31 \text{ мм}^2$) с 47% до 82%, а также сократил число каналов, расположенных ниже нижнего значения допуска ($1132,93 \text{ мм}^2$) с 53% до 18% межлопаточных каналов.

На рисунке 10 показано изменение общей площади проходного сечения соплового аппарата. Видно, что сопловые лопатки, полученные после литья (без разворота), не обеспечивают суммарную площадь проходного сечения соплового аппарата. Однако тот же комплект сопловых лопаток, виртуально развёрнутый на расчётный угол и обработанный с корректирующим углом, позволил достичь середины поля допуска и обеспечил общую площадь проходного сечения соплового аппарата в заданном допуске $43267,6 \pm 216 \text{ мм}^2$.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В результате анализа применяемой серийной технологии изготовления соплового аппарата установлено, что для обеспечения площади проходного сечения соплового аппарата 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 профилешлифовальный станок с ЧПУ, высокопористые шлифовальные круги и непрерывная правка круга.
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 СПО, которое позволяет выполнить виртуальную сборку соплового аппарата из оцифрованных сопловых лопаток и достоверно прогнозировать площади проходного сечения соплового аппарата после сборки обработанных лопаток в 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 шлифовальном станке с ЧПУ.

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

- обработано 40 комплектов сопловых лопаток 2 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 шлифовальный станок с ЧПУ, который позволил минимизировать число операций, повысил производительность обработки и улучшил качество изготовления сопловых лопаток 2 ступени ТВД;

- 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 млн руб. в год), которые требуются для обработки каждого типа сопловых лопаток на токарно-лобовом станке.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Норин, А. О. 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. – С. 42-46.
2. Норин, А. О. Особенности применения многокоординатных шлифовальных станков с ЧПУ для повышения производительности, качества, точности обработки деталей и узлов авиационных газотурбинных двигателей / Макаров В.Ф., Песин М.В., Норин А.О. // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 2(14). – С. 19-26.
3. Норин, А. О. Повышение качества и производительности при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток / С.П. Никитин, В.Ф. Макаров, Норин А.О. // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – №5. – С. 17-24.
4. Norin, O. Increase in productivity and quality based on the control of thermodynamic processes during deep profile grinding of the gas-turbine engine blade / V Makarov, S Nikitin, M Pesin, V Karmanov, and O Norin // Journal of Physics: Conference Series 2131 (2021) 022036 doi:10.1088/1742-6596/2131/2/022036.
5. Патент № RU №2648174 С1. Способ обработки радиальной торцевой канавки на детали газотурбинного двигателя: №2648174 : заявл. 06.06.2017 : опубл.

22.03.2018 / С.В. Кобелев, Д.В. Тукачев, А.О. Норин; заявитель АО «ОДК-Авиадвигатель». – 1 с.