

На правах рукописи



ИОНОВ Алексей Владимирович

**СОЗДАНИЕ НА ОСНОВЕ CALS-ТЕХНОЛОГИЙ УНИВЕРСАЛЬНОЙ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
ПОДГОТОВКОЙ ПРОИЗВОДСТВА ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД**

Специальность 05.07.05

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Новиков Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: Кульга Константин Станиславович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет», профессор кафедры
«Мехатронные станочные системы»

Кузнецов Игорь Игоревич
кандидат технических наук,
ФГУП «Научно-производственный центр
газотурбостроения «САЛЮТ», зам. директора по САПР

Ведущая организация: ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн»
(ОАО НПО «Сатурн»)

Защита состоится «15» декабря 2014 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.125.08, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ), по адресу: 125993, Россия, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ)
<http://www.mai.ru/events/defence>.

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д212.125.08,
д.т.н., профессор

Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В настоящее время в России ведутся несколько проектов по созданию КВД для новых ГТД и освоению производства существующих двигателей, идет оптимизация производств по загрузке предприятий и их технологическим компетенциям. При этом анализ ситуации показывает, что до настоящего времени на предприятиях отсутствуют единые подходы к выбору технологии изготовления новых лопаток. На разных предприятиях для изготовления конструктивно схожих лопаток используют кардинально различные методы обработки, а также слабо развит технико-экономический анализ предлагаемых и существующих технологий изготовления лопаток. Одной из причин данной проблемы является отсутствие методик и инструментов по сбору, хранению и использованию информации, необходимой для оценки вариантов технологических процессов.

Решением данных проблем может стать создание автоматизированной системы управления ТПП лопаток компрессора на основе CALS-технологий.

Существующие коммерческие программные решения позволяют реализовать автоматизированную систему управления технологической подготовкой производства лопаток КВД. Такая система должна быть неотъемлемой частью глобальной системы управления ЖЦИ, которые сейчас строятся на основе принципов CALS-технологий. Но, не смотря на то, что на предприятиях отечественного авиадвигателестроения ведется внедрение систем, реализующих принципы CALS-технологий начиная с середины 90-х годов XX века, существенных результатов удалось добиться только в развитии CAD\CAM\CAE систем. Это стало следствием того, что внедрение CALS-технологий в отечественном авиадвигателестроении по отношению к западным компаниям носило догоняющий характер и строилось на принципах «лоскутной» автоматизации различных функций, в то время как западные компании шли по пути автоматизации процессов, что в свою очередь позволяло им автоматизировать отдельные функции в рамках единой методологии, которая и получила название CALS.

Разработка и внедрение автоматизированной системы управления ТПП лопаток компрессора на основе CALS-технологий позволит решить следующие задачи:

- сбор и хранение данных по существующим технологическим процессам изготовления лопаток КВД (маршрутное и операционное описание, режимы обработки и др.);
- сбор и хранение данных по применяемым средствам технологического оснащения (СТО);
- сбор и хранение данных и статистики по исследованиям лопаток как в результате текущего производственного контроля, так и по результатам эксплуатации изделия;

- структурирование данных для последующей передачи на экономический анализ и планирования работы предприятия;
- структурирование данных для проведения сравнительного анализа вариантов технологического процесса.

При условии использования CALS-технологий предлагаемое решение в рамках предприятия должно позволить:

- уменьшить время необходимое на ТПП;
- снизить количество ошибок и переделок на этапах ТПП и производства;
- снизить издержки при производстве;
- снизить стоимость конечного изделия.

Указанные результаты применения данной системы достигаются за счет: упрощения и ускорения доступа к необходимой службам предприятия информации, представления правильной и актуальной информации, оценки принимаемых технологических решений в условиях наличия всего необходимого объема технической и технико-экономической информации.

Еще больших эффектов от использования такой системы можно ожидать, применяя ее на уровне кооперации нескольких предприятий в рамках отрасли или ОДК. Создание и развитие данной системы позволит оптимизировать производство лопаток КВД в условиях кооперации по конструктивно-технологическим признакам лопаток и конкретным методам обработки освоенных на различных предприятиях.

Для успешного создания автоматизированной системы управления ТПП лопаток компрессора на основе CALS-технологий необходимо решить ряд методических проблем, связанных с отсутствием единого методического подхода по выбору технически обоснованных технологий производства лопаток ГТД и методик организации ТПП в условиях применения принципов CALS.

Цель работы: повышение эффективности технологической подготовки производства и сокращение сроков освоения производства лопаток компрессоров ГТД.

Задачи исследования:

1. Разработать методику выбора технически обоснованной технологии производства лопатки КВД на основе ее конструктивных особенностей и с учетом требуемых технологических показателей ее качества.
2. Разработать методику организации процессов ТПП лопаток компрессоров ГТД на основе CALS-технологий с применением PLM/PDM систем для управления данными об изделии.

3. Провести апробацию универсальной автоматизированной системы управления ТПП лопаток компрессора ГТД, выполненной на основе предложенных методик и реализованной с помощью существующих коммерческих пакетов, построенных на принципах CALS-технологий.
4. Провести экспериментальное исследование лопаток КВД, технологический процесс на которые разработан с учетом методик по п. 1 и 2 с применением универсальной автоматизированной системы управления ТПП лопаток компрессора ГТД.
5. Сделать выводы о целесообразности применения разработанных методик по результатам апробации и экспериментальных исследований.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана и апробирована методика выбора технически обоснованной технологии производства лопатки КВД.
2. Разработана и апробирована методика организации процессов ТПП лопаток компрессоров ГТД на основе CALS-технологий с применением PLM\PDM систем.
3. Получены экспериментальные данные по распределению остаточных напряжений в поверхностном слое лопатки и пределы усталостной прочности в зависимости от применения обработки пера методом вальцевания или фрезерования.

Практическая значимость результатов состоит в том, что разработанная автоматизированная система позволяет:

- собирать и хранить данные по существующим технологическим процессам изготовления лопаток КВД, средствам технологического оснащения (СТО), экспериментальным исследованиям и данным по эксплуатации лопаток;
- систематизировать и представить технологические данные для экономического анализа, а также использовать при планировании выпуска изделий на предприятии;
- структурировать технические данные для проведения сравнительного анализа вариантов технологического процесса.

Степень обоснованности и достоверность полученных результатов подтверждается использованием известных научных положений и методов расчета, применением инструментов функционального моделирования процессов, а также проведением апробации методик с последующим экспериментальным исследованием образцов на аттестованных средствах измерения.

Вкладом автора является:

1. Методика организации процессов ТПП лопаток компрессоров ГТД на основе CALS-технологий с применением PLM\PDM систем для управления данными об изделии.
2. Методика выбора технически обоснованной технологии производства лопатки КВД.
3. Подготовленная к апробации универсальная автоматизированная система управления ТПП лопаток компрессора ГТД.
4. Подготовка в автоматизированной системе управления ТПП лопаток компрессора ГТД серийной и экспериментальной технологии изготовления лопатки КВД.
5. Обработка результатов экспериментальных исследований лопаток КВД, выполненных по различным технологиям.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: на конференция в рамках конкурса «Молодежь и будущее авиации и космонавтики», Москва, 2009 и 2011 гг., на 10-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2011», Москва, 2011 г., на Международном молодежном форуме «Будущее авиации за молодой Россией». Рыбинск, 2012 г., на Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике», Москва, 2012 и 2013 гг., на форуме «Будущее авиации и космонавтики за молодой Россией», МО, г. Жуковский, 2013 г., на научных семинарах кафедры «Технология производства двигателей летательных аппаратов» МАИ (НИУ).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, из них 5 статей в журналах, имеющих аккредитацию ВАК, выполнена научно-исследовательская работа №14.132.21.1575 в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. на тему «Исследование и совершенствование технологий изготовления элементов компрессоров и агрегатов авиационных газотурбинных двигателей с целью повышения их технических параметров и сокращения сроков создания».

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка используемых источников из 63 наименований, изложена на 126 страницах машинописного текста, включающего 59 иллюстраций и 19 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, рассматривается ее научная новизна и практическая значимость. Дается описание структуры и содержания диссертации.

В первой главе проведен анализ существующих технологий производства лопаток компрессора газотурбинных авиационных двигателей. Рассмотрены вопросы применяемых материалов, требований по точности изготовления лопаток различных размерных групп, проведен предварительный анализ факторов, которые влияют на выбор технологии изготовления и оценены положительные и негативные последствия применения основных методов формообразования пера лопатки. Также рассмотрены вопросы применения CALS-технологий в авиадвигателестроении. На основе проведенного анализа сформулированы задачи, необходимые для достижения цели данной работы.

Во второй главе приводится порядок оценки параметров качества лопатки КВД. Разработана и описана методика выбора технически обоснованной технологии производства лопатки КВД. Методика строится на основе учета при разработке технологии изготовления показателей качества лопатки КВД.

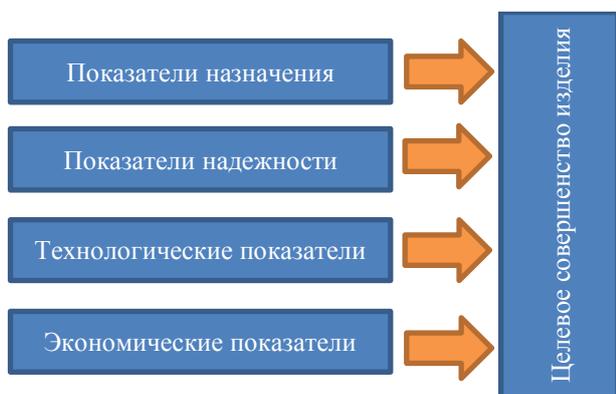


Рисунок 1. Показатели качества лопаток КВД.

Учитываются показатели относящиеся к показателям назначения, надежности, технологическим и экономическим показателям качества лопатки (рисунок 1).

К показателям назначения принято относить характеристики определяющие функциональное назначение изделия. В случае лопатки ГТД это конструктивные особенности изделия. С точки зрения ТПП эти показатели закладываются конструктором в КД. При формировании технологии изготовления лопатки они становятся ограничениями на техпроцесс. Например, при наличии у лопатки двух замков (хвостовиков) невозможно применять вальцевание для формообразования пера. Кроме таких очевидных зависимостей существуют и менее очевидные, например, при возрастании угла закрутки пера при определенных соотношениях припуска, длины заготовки и хорды пера, становится технологически невозможно получить перо вальцеванием. Похожая ситуация и с лопатками двигателей пятого поколения, где из-за резких изменений хорды и закрутки пера невозможно распределить припуск по перу лопатки вальцеванием без образования задиров, волосовин и т.д.

Ресурс изделия – основной показатель надежности для лопатки компрессора ГТД. На ресурс лопатки влияют несколько факторов. В первую очередь ресурс обеспечивается совершенством конструкции детали и правильностью выбора материала детали, эти факторы обеспечиваются на этапе конструкторской проработки. Во вторую очередь - надежность изделия обеспечивается технологическими показателями качества.

Важными факторами, влияющим на надежность лопатки, является технологическое обеспечение заданных допусков, структуры материала детали и характеристик поверхностного слоя. Сильное влияние на конструктивную прочность рабочей лопатки оказывает место перехода пера лопатки к замкам и полкам, структура и шероховатость поверхности, внутренняя структура материала, коррозионная стойкость поверхности лопатки, сопротивление фреттинг-износу поверхностей замков и полков. Коррозионная стойкость и фреттинг-износ подробно не рассматриваются, так как обеспечиваются специализированными покрытиями.

Геометрическая точность изготовления поверхностей замков и пера лопаток КВД строго контролируется на различных этапах технологического процесса, и в целом существующими технологическими приемами обеспечивается на уровне требований, устанавливаемых конструкторами. При выполнении требований по геометрической точности и характеристикам материала исходной заготовки получают достаточно стабильные характеристики по разбросу частот собственных колебаний лопаток КВД.

Особо сильно влияние применяемых методов обработки на технологические показатели качества можно заметить на таких показателях качества, как распределение остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопатки и пределе усталостной прочности, как показателе, который в совокупности определяет технологическое и конструктивное совершенство лопатки. Требования по этим показателям могут быть определены только за счет накопления производственной и экспериментальной информации по исследованию лопаток КВД.

Одним из способов повышения сопротивления усталости компрессорных лопаток является поверхностное упрочнение. Из упрочняющих обработок наибольшее распространение получила виброгалтовка, которая применяется одновременно с виброшлифованием. Поверхностно-упрочняющие обработки, не меняя характера кривой усталости, могут увеличивать долговечность и предел выносливости.

В лопатках компрессора, имеющих тонкие кромки, достичь значительного повышения предела выносливости за счет применения интенсивных способов поверхностного упрочнения не удается, а в некоторых случаях при толщине кромок 0,2-0,3 мм имеет место снижение сопротивления усталости за счет повреждения кромок из-за сквозного наклепа,

способствующего снижению пластических свойств материала. Избежать этого недостатка удастся применением в качестве уплотнителя микрошариков.

Хотя поверхностное упрочнение и способствует выравниванию механических свойств поверхностного слоя детали, однако разброс значений долговечности может быть неудовлетворительным, так как поверхностное упрочнение не может устранить влияние локальных структурных дефектов поверхностного слоя. Положительные результаты (как для стальных, так и титановых лопаток) могут быть получены при применении стабилизирующего отпуска.

На этапе технологической подготовки производства экономические показатели качества оценивать проблематично, это является задачей экономических служб предприятия. Тем не менее предварительную оценку произвести можно имея только технологические данные.

Показатели отдельных этапов техпроцесса будем рассчитывать отдельно для каждой группы операций по отношению к вальцеванию, то есть $P_{Ti} = P_{vi} / P_{Ti}$, где P_{Ti} – значение данного показателя для выбранной технологии, T – рассматриваемая технология (вальцевание, электрохимическая обработка, фрезерование), P_{vi} – значение параметра для вальцевания соответствующее данному показателю, P_{Ti} – значение параметра для конкретной технологии, соответствующее данному показателю, таким образом, для вальцевания все показатели равны 1. Интегральный показатель будем рассчитывать как произведение всех P_{Ti} для данной технологии и данного показателя. Для наглядности представим полученные значения в виде диаграмм (рисунок 2), где по осям отложены десятичные логарифмы значений P_{Ti} .

Если анализировать рисунок 2, то можно отметить, что приведенные оценки подтверждают то, что вальцевание является наиболее производительным методом изготовления лопаток компрессоров, при этом стоимость получаемой детали не сильно отличается от других способов производства. Но следует отметить, что в данных на рисунке 1 не учтены затраты и время на подготовку и освоение производства, что для техпроцессов с вальцеванием и электрохимической обработкой требует значительных ресурсов и опыта внедрения этих технологий. Характер распределения кривых показывает, что наиболее экономически целесообразным технологическим процессом может быть технология с применением круговой ЭХО для заготовок с большим припуском, с последующей упрочняющей обработкой.

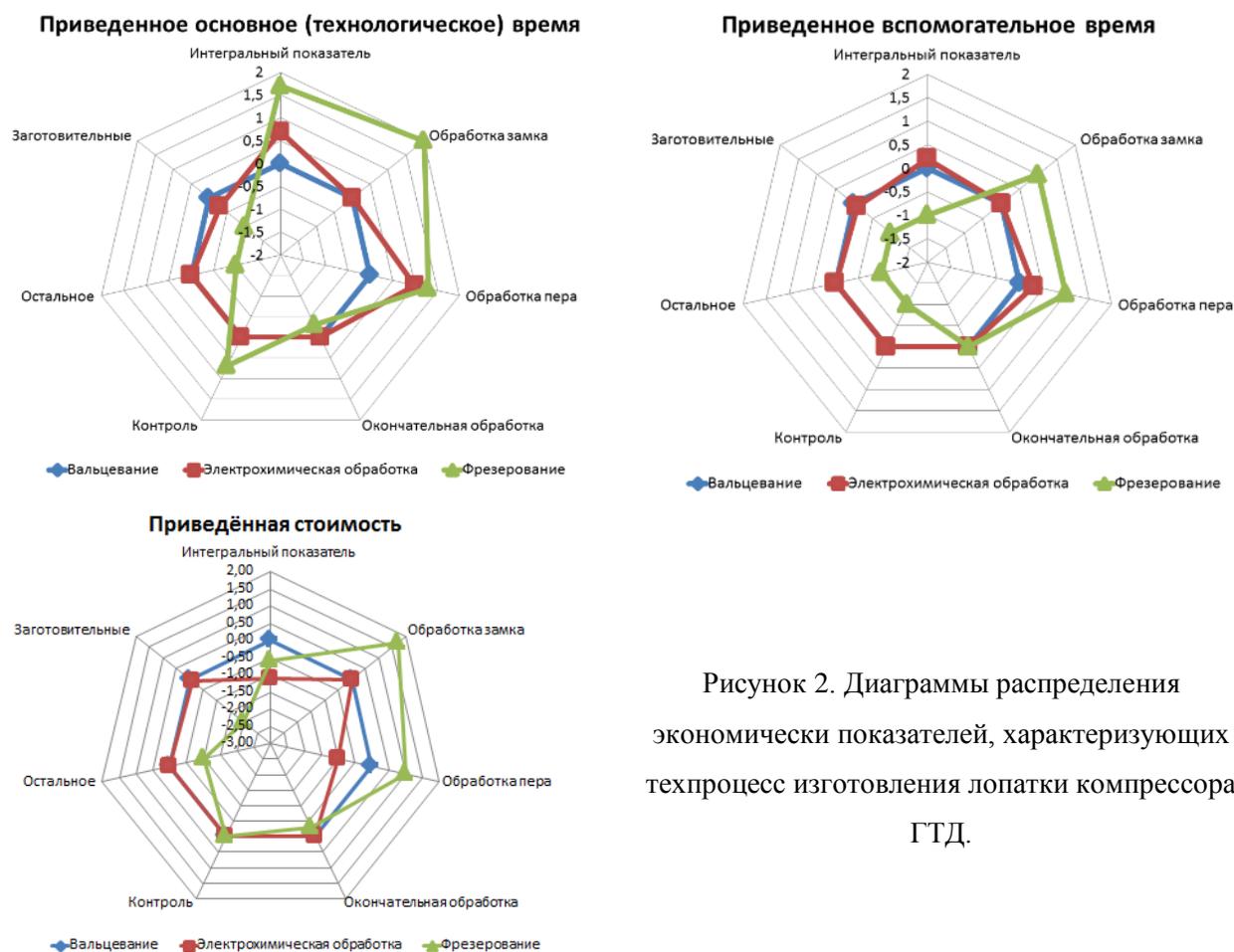


Рисунок 2. Диаграммы распределения экономически показателей, характеризующих техпроцесс изготовления лопатки компрессора ГТД.

При описании последовательности разработки маршрутной технологии необходимо учитывать технологическую наследственность. В техпроцессе изготовления лопатки КВД существуют такие операции, применение которых влечет за собой необходимость применения дополнительных мероприятий либо по контролю, либо по устранению негативных следствий применения данных операций, например - таблица 1.

Таблица 1. Технологическая наследственность.

Операция	Вид негативного эффекта	Способ устранения
Штамповка, изотермическая штамповка	Высокая степень внутренних напряжений	Высокотемпературный отжиг
ЭХО	Наличие дефектного слоя	Полировка, шлифование, виброгалтовка, гидродробеструйная и др.
Вальцевание	Возможность появления трещин, волосовин и др.	Тотальный контроль ЛЮМ
Вальцевание	Невозможность обработки скруглений от пера к замку	Ручная или автоматизированная полировка скруглений
Фрезерование	Вероятность появления неравномерности обработки	Контроль геометрии на КИМ

Для каждого предприятия картина распределения показателей техпроцесса изготовления лопаток может быть различна. Поэтому для того, чтобы делать окончательные выводы о применимости той или иной технологии, необходимо проведение обработки статистических данных по предприятиям отрасли (в том числе и по эксплуатации изделий), по нескольким изделиям с разбитием лопаток по группам в зависимости от размеров, классов точности, ресурсов, материалов. Частично такая классификация присутствует в отраслевых стандартах. Для того, чтобы дополнить приведенную в стандартах классификацию, разработана дополнительная классификация по конструктивным признакам – таблица 2.

Таблица 2. Классификатор конструкций.

Параметр	Значение параметра	Обозначение
Тип лопатки	Дозвуковая	Д
	Сверхзвуковая	С
Высота лопатки, h	до 120 мм	012
	от 120 до 250 мм	025
	от 250 до 800 мм	080
Хорда, b	от 20 до 80 мм	800
	от 80 до 250 мм	250
	от 250 до 550 мм	550
	от 550 мм	500
Верхняя полка	Нет	00
	С цилиндрическим хвостовиком	01
	Кольцевой паз	02
Антивибрационная полка	Да	01
	Нет	00
Тип замка	Ласточкин хвост	01
	Кольцевой паз	02
	Елочка	03
	Шарнир	04

На этапе ТПП необходимо проводить оценку большого количества данных, имеющих различные источники и форму представления. Для описания процессов ТПП применена методология IDEF (рисунок 3).

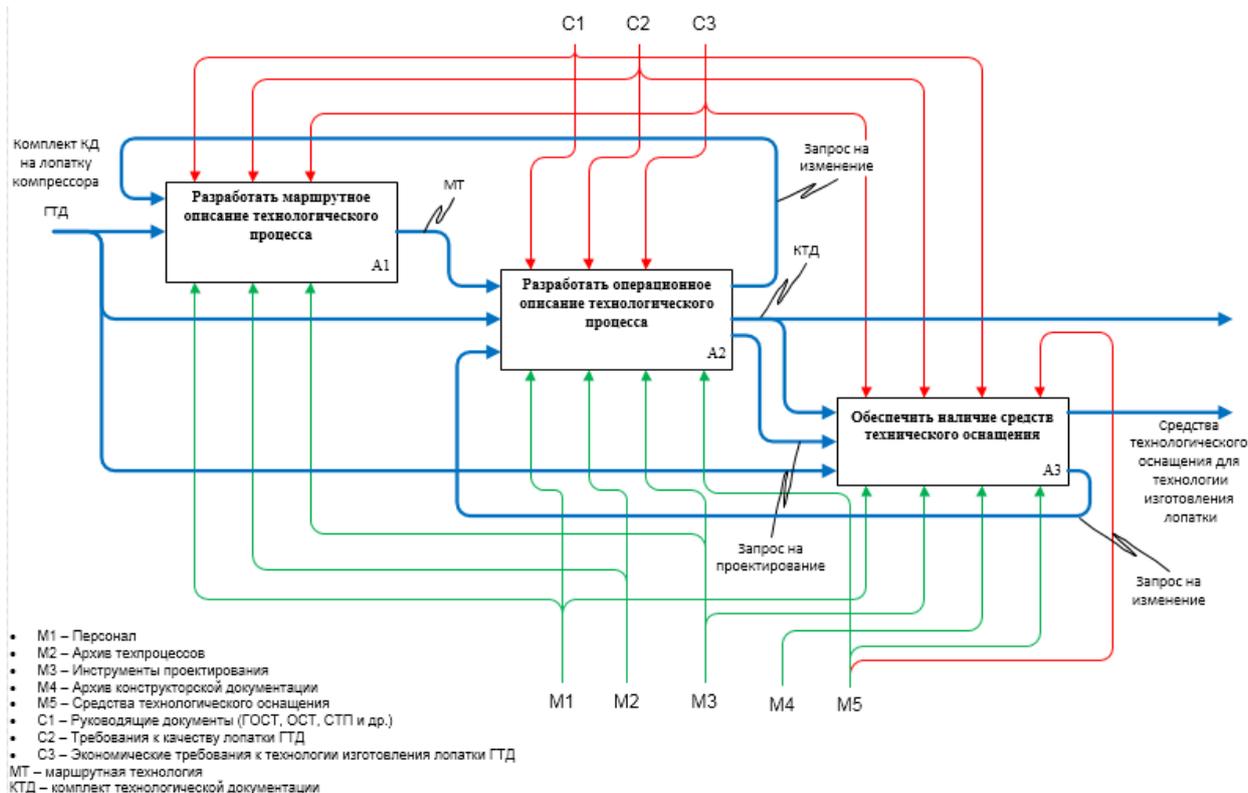


Рисунок 3. Диаграмма процесса ТПИ.

При разработке маршрутной технологии на первом этапе выбираются методы нанесения покрытия, так как эти операции предъявляют специфические требования к подготовке поверхностей, требуют наличия специализированного оборудования и приспособлений.

На следующем этапе необходимо определить метод, которым будет происходить окончательное формообразование пера лопатки и поверхностей замков и полок. В целом, именно на этом этапе определяется, удовлетворит ли готовое изделия целевые показатели качества, и формируется представление о том, какие дополнительные мероприятия необходимо провести для их обеспечения в связи с особенностями применяемых методов обработки.

На основании выбора припуска на окончательную обработку и определения способа получения заготовки можно производить окончательное формирование технологического процесса.

Применение вышеизложенной методики на конкретной лопатке продемонстрирована на рисунке 4, общая схема алгоритма – рисунок 5.

Порядок реализации этапов предложенной методики основан на общих принципах построения ТПИ лопаток КВД.

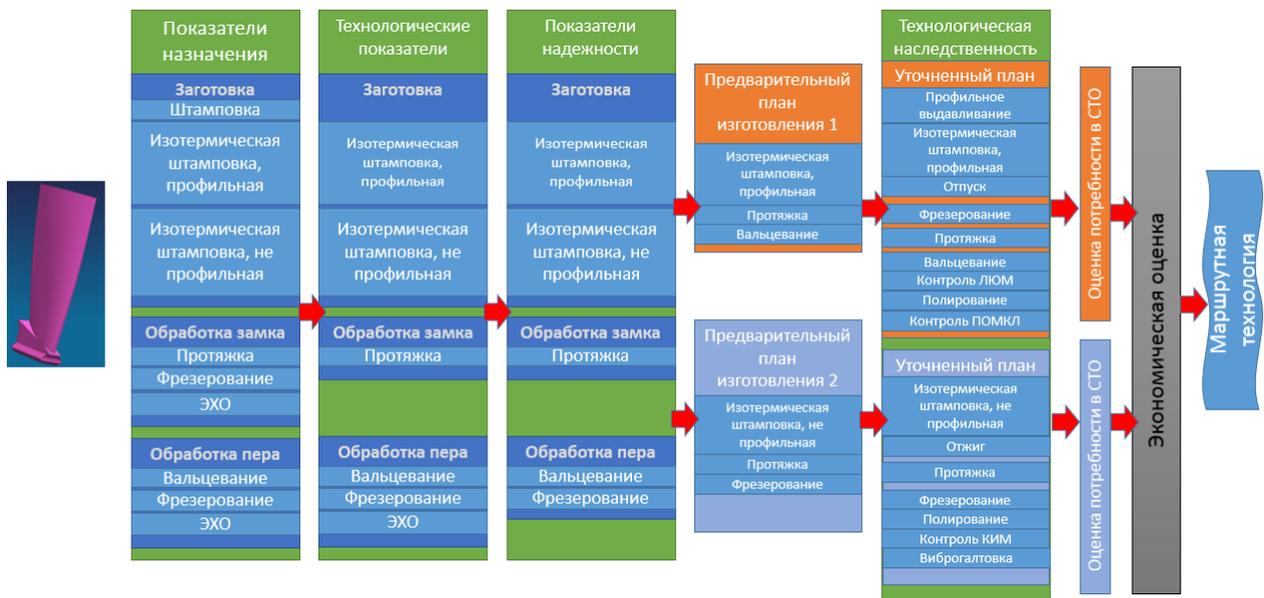


Рисунок 4. Пример применения методики выбора технически обоснованной технологии изготовления лопатки.

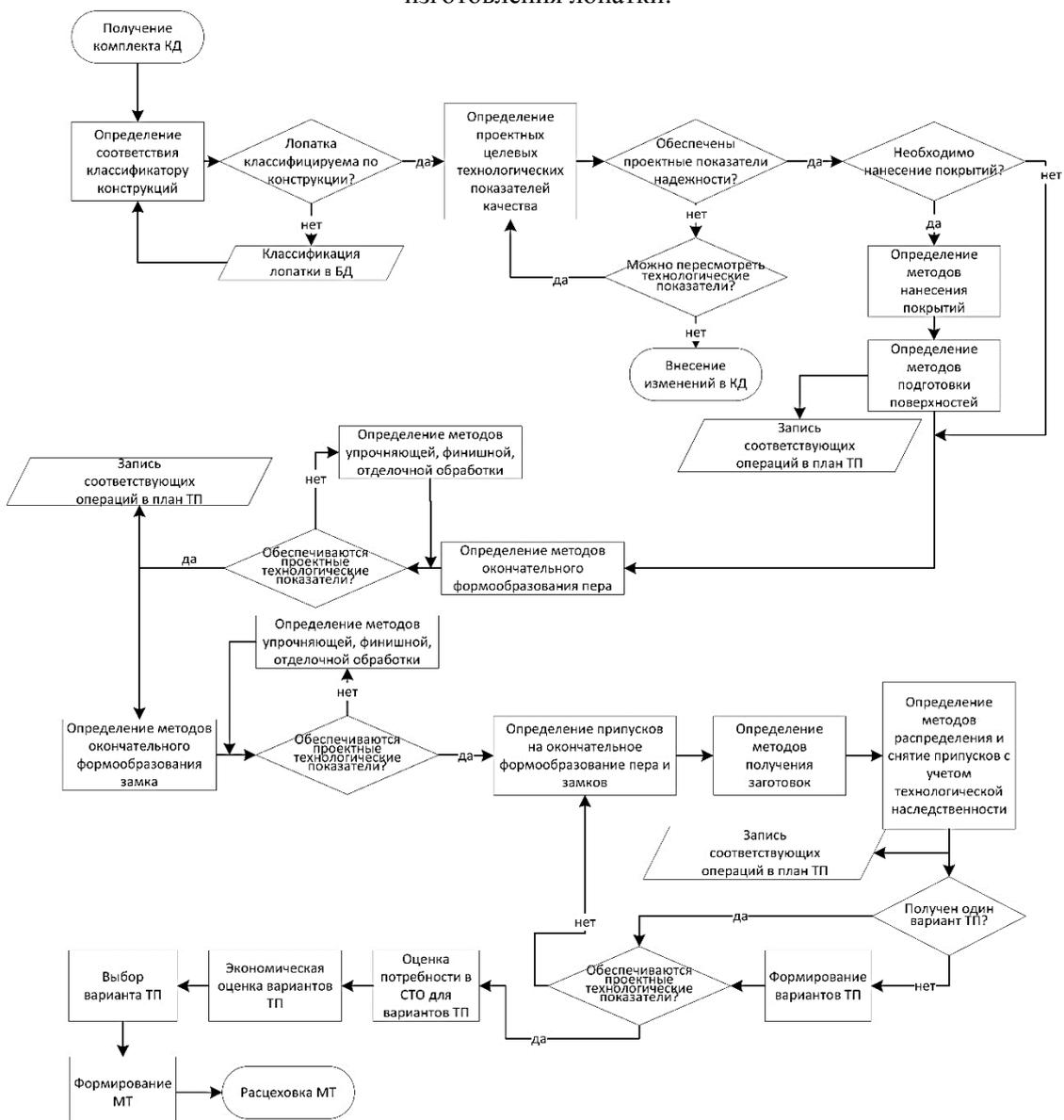


Рисунок 5. Алгоритм проектирования технологического процесса изготовления лопатки.

Порядок реализации этапов предложенной методики основан на общих принципах построения ТПП лопаток КВД.

В третьей главе приводится описание методики организации процессов ТПП лопаток компрессоров ГТД на основе CALS-технологий и с применением PLM\PDM систем для управления данными об изделии. Рассмотрены виды и типы данных, используемые на этапе ТПП при производстве лопатки, а также данные экспериментальных исследований и данные по эксплуатации изделия. Классифицированы данные описывающие СТО, рассмотрены вопросы доступа к данным и управление конструкторскими и технологическими данными.

Реализация предложенной методики выбора технически обоснованной технологии изготовления лопатки КВД может быть эффективна только в условиях накопления и обработки большого количества информации конструкторского, технологического, экономического и эксплуатационного назначения. Это позволит применять предложенную методику для оптимизации техпроцессов, проводить экономическую оценку эффективности внедрения новых методов обработки, снизить время и затраты, необходимые на освоение производства новых конструкций лопаток КВД. Основная проблема при реализации такого подхода состоит в том, что на предприятиях отсутствуют системы, позволяющие управлять всеми необходимыми данными в едином информационном пространстве. Для решения этой задачи предлагается методика организации процессов ТПП лопаток компрессоров ГТД на основе CALS-технологий с применением PLM\PDM систем для управления данными об изделии.

На этапе ТПП входными данными для проектирования является конструкторское описание изделия – лопатки. Так же при проектировании СТО на этапе ТПП применяется конструкторской описание, например, технологической оснастки и инструмента. Конструкция описывается сборочными единицами и деталями через входимость компонентов. Каждая деталь и сборочная единица в свою очередь описывается простейшими элементами геометрии – поверхностями.

Для описания технологического процесса изготовления лопатки КВД необходимо иметь описание на все данные, описывающие СТО. В общем случае к ним относятся: оборудование, инструмент, оснастка. Все эти виды СТО подразделяются по типам (например, станок фрезерный или станок токарный) и видам (например, станок горизонтально-фрезерный или вертикально фрезерный) и могут различаться по конкретным моделям или иметься в количестве большем, чем один экземпляр.

Соответственно для описания структуры предприятия используется классификатор цех-участок. Связь между оборудованием и его расположением на предприятии задается на уровне базы данных.

Для описания технологического процесса будем использовать терминологию процесс-операция-переход, что полностью соответствует терминологии применяемой в стандартах ЕСТД.

Связь между объектами базы данных производится на уровне базы с использованием семантической связи родитель-потомок или объект-объект. Связь между переходами и операциями может быть осуществлена на уровне базы данных, но чаще всего для этого применяются средства CAD\CAM системы. Схематично это можно представить в виде взаимосвязей – рисунок 6.

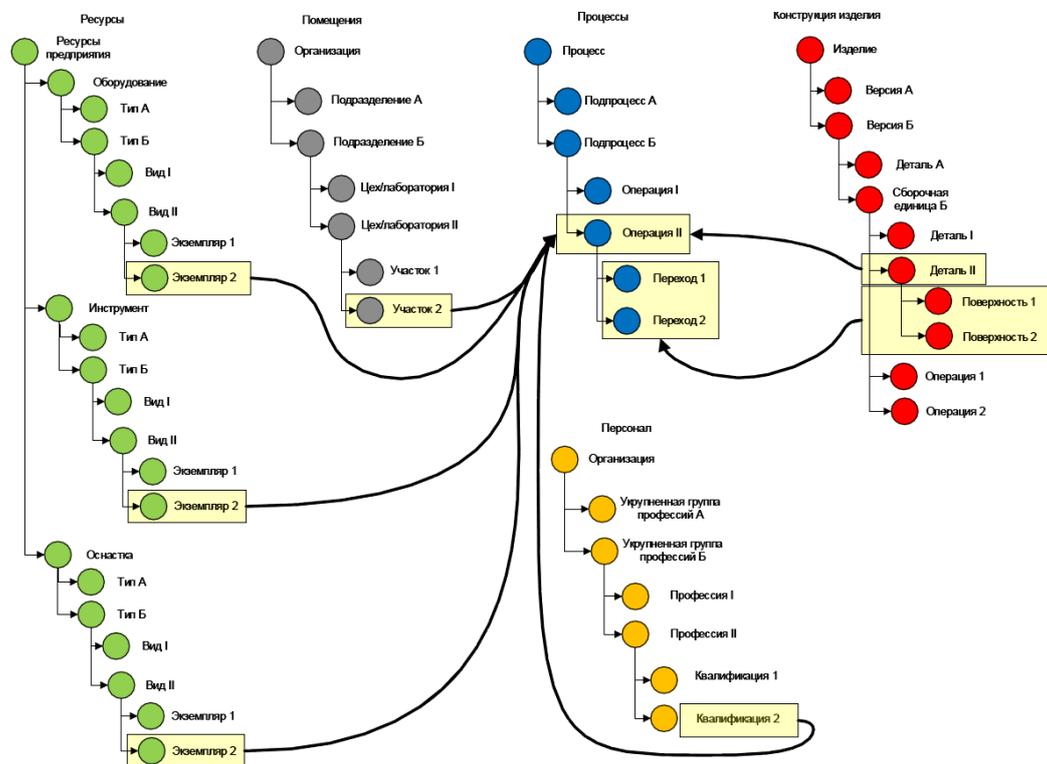


Рисунок 6. Связи объектов БД.

Для решения задач планирования производства предложенная методика позволяет учитывать профессиональную квалификацию персонала.

Согласно стандартам на ТПП составлен укрупненный перечень технологической документации, формируемый на этапе ТПП (у каждого предприятия есть своя специфика в комплектности технологической документации). На основании этого перечня можно сделать вывод, что большая часть документации представляет из себя ведомости и иерархические документы с четкими связями между данными, что поддается полной автоматизации при наличии в системе всего объема необходимой информации. Предложенной методикой решается задача установления связей между различными видами технологической информацией. Создание и хранение графической информации (чертежи, карты наладки, эскизы операций) решается на уровне интеграции PDM и CAD систем.

Отдельно рассмотрена проблема хранения различной информации, получаемой экспериментальным путем – данные по текущему контролю и экспериментальным

исследованиям, а также данные, полученные после эксплуатации изделий. Порядок подготовки образцов описывается при помощи инструментов операционного описания, применяемого для техпроцессов. Аналогично проводится описание самого процесса исследования, с учетом необходимого оборудования, материалов, инструмента. Для хранения необработанных экспериментальных данных возможно использовать файловое хранение в БД, для хранения обработанных данных (зависимостей, таблиц, значений) предлагается использовать отдельно настраиваемые для каждого вида исследования стандартизованные свойства объектов БД.

Четвертая глава посвящена описанию апробации предложенных методик при помощи существующих коммерческих пакетов реализующих принципы CALS-технологий (CAD\CAM\CAE системы NX и PLM-системы Teamcenter), а также экспериментальному исследованию лопаток КВД двигателя ВК-2500.

В качестве системы PDM\PLM системы использована система Teamcenter, CAD система – NX, разработки компании SIEMENS PLM. Выбор обусловлен тем, что данные системы используются на большинстве предприятий двигателестроения.

На основе предложенных методик разработана модель данных системы Teamcenter (далее – ТС). Система поддерживает управление: конструкторскими данными (чертежи и модели лопаток и других деталей ГТД), конструкторскими данными СТО (инструмент, спецоборудование, оснастка), маршрутной и операционной технологий, карт наладки. Пример окна ТС для операции фрезерования пера лопатки на ЧПУ в контексте маршрутной технологии изготовления лопатки КВД показан на рисунке 7.

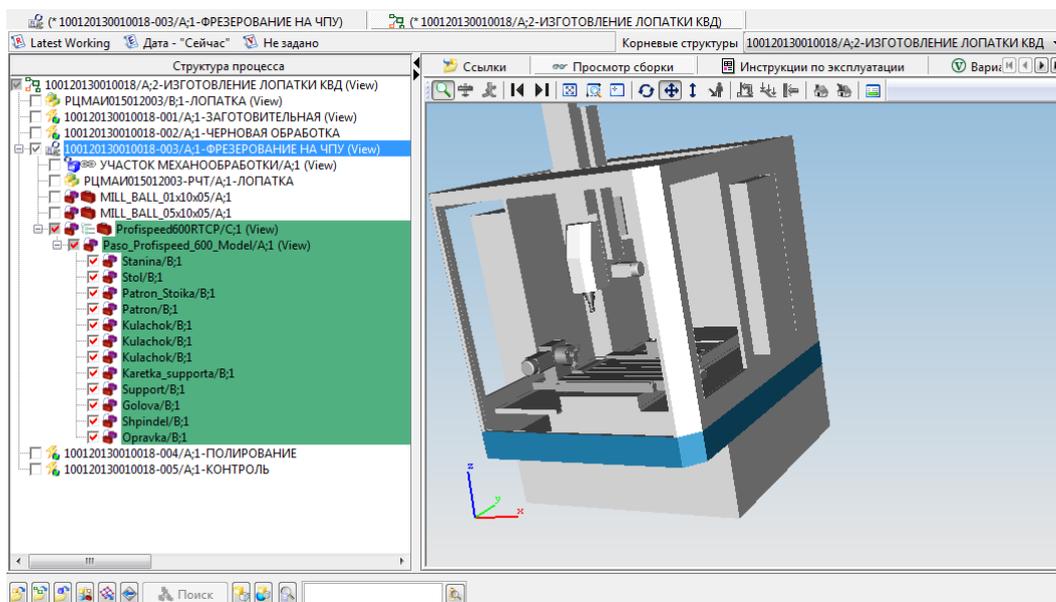


Рисунок 7. Операция фрезерование пера лопатки в системе ТС.

Кроме того, в системе ТС реализованы основные бизнес-процессы документооборота при проведении ТПП с учетом алгоритмов реализации предложенных методик.

Апробация разработанных методик и универсальной автоматизированной системы управления ТПП лопаток компрессора ГТД была проведена на предприятии ОАО «ММП им. В.В.Чернышева» на лопатках КВД двигателя ВК-2500.

В результате проведенных работ были предложены два технологических процесса, которые должны обеспечить схожие технологические показатели качества и показатели надежности лопатки. Один технологический процесс подразумевал окончательное формообразование пера лопатки методом холодного вальцевания и является аналогичным изготовлению подобных лопаток на предприятии (ОАО «ММП им. В.В.Чернышева»). Второй технологический процесс предусматривает формообразование пера лопатки методом фрезерования.

На предприятии, в процессе освоения производства лопаток КВД двигателя ВК-2500, были изготовлены экспериментальные образцы, выполненные по серийной технологии с применением метода холодного вальцевания пера лопатки (материал ВТ8) и по экспериментальной технологии с применением фрезерования пера от штампованной заготовки в виде бруска (материал ВТЗ-1).

Образцы были исследованы в заводской лаборатории. Для представленных образцов были проведены исследования по определению распределения остаточных напряжений в поверхностном слое. Для лопатки 5-ступени КВД, выполненной по обеим технологиям, определены пределы усталостной прочности.

При обработке результатов исследований распределения остаточных напряжений в поверхностном слое лопаток было проведено сравнение полученных данных с лопатками той же группы (в соответствии с классификацией) (рисунок 10). Кроме того, проведено сравнение с лопатками НА той же размерной группы, изготовленными методом ЭХО, и лопаткой КНД 3-ей ступени, выполненной фрезерованием (рисунок 8), а также сравнение с лопаткой КНД 1-ой ступени, входящей в другую размерную группу.

Минимальные значения напряжений сжатия в поверхностном слое демонстрируют лопатки, обработанные методом ЭХО. Максимальные значения напряжений сжатия получаются при обработке методом вальцевания, причем, в отдельных случаях, могут достигаться значения, превышающие рекомендованные ЦИАМ.



Рисунок 8. Сравнение остаточных напряжений, полученных на лопатке направляющего аппарата после ЭХО и фрезерования пера.

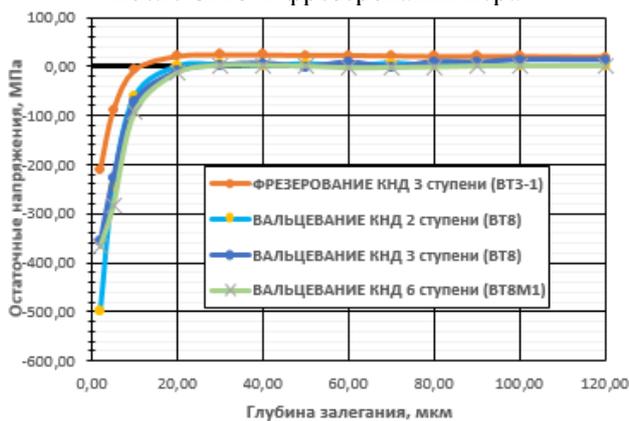


Рисунок 10. Сравнение остаточных напряжений, полученных на лопатках после фрезерования и вальцевания пера.

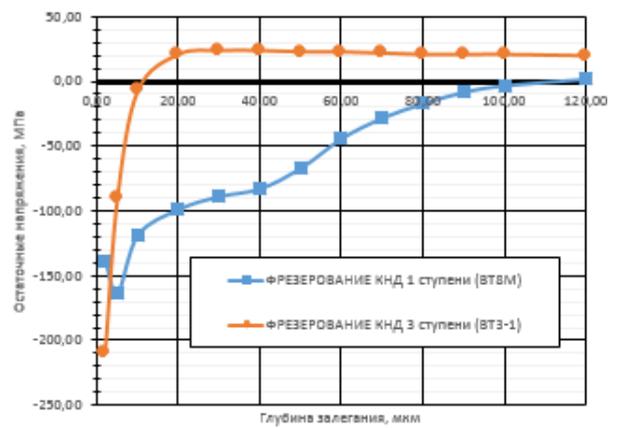


Рисунок 9. Сравнение остаточных напряжений, фрезерованных лопаток КНД и КВД разных размеров.

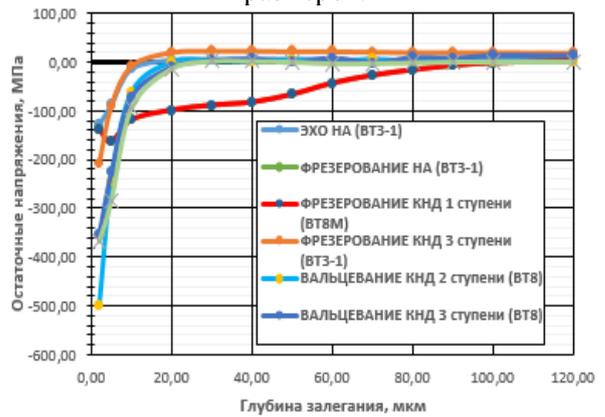


Рисунок 11. Совмещенные графики распределения остаточных напряжений.

Так же необходимо отметить, что свое влияние оказывают и габаритные размеры лопаток. С уменьшением размеров лопаток при вальцевании наблюдается тенденция к уменьшению напряжений сжатия без увеличения глубины их залегания. Для крупногабаритных лопаток при фрезеровании наблюдается неблагоприятная картина распределения остаточных напряжений.

Анализируя полученные данные, можно утверждать, что предложенные технологии изготовления имеют аналогичные показатели качества по распределению остаточных напряжений в поверхностном слое.

Для подтверждения усталостной прочности лопаток, изготовленных фрезерованием, было проведено исследование лопаток 5-ой ступени КВД, изготовленных по обеим технологиям. Результаты исследования приведены на рисунке 12.

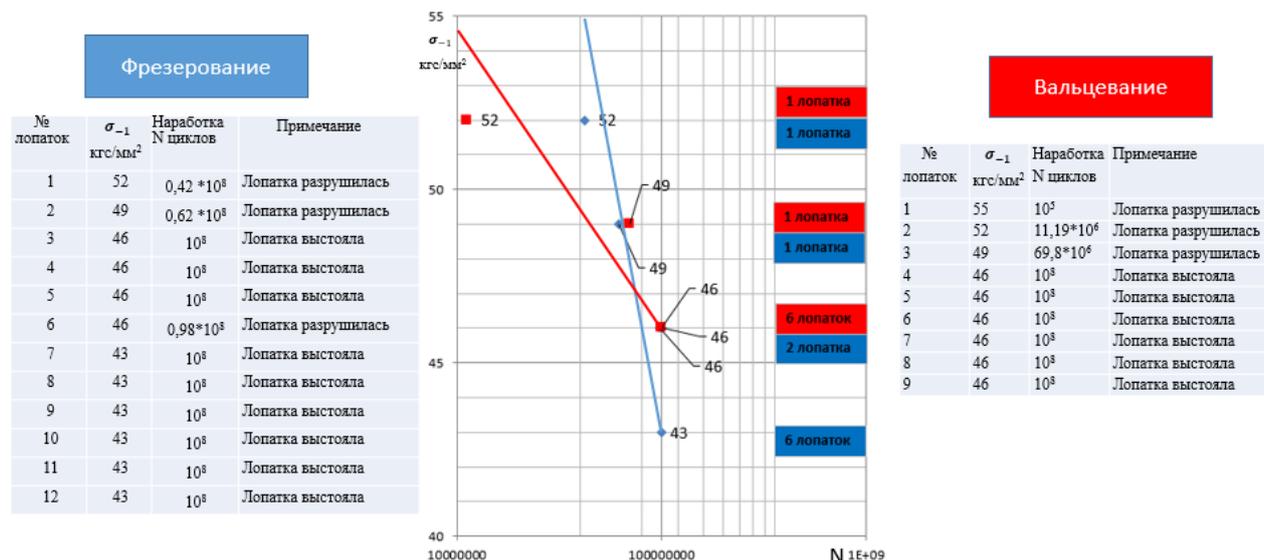


Рисунок 12. Предел усталостной прочности лопатки КВД 5-ой ступени.

Проведенные исследования усталостной прочности лопаток компрессора ГТД показали, что предел усталостной прочности исследуемых лопаток, выполненных методом фрезерования из упрощенной штамповки, составляет не менее $\sigma_{-1}=43$ кг/мм². Для лопаток, аналогичных по конструкции и изготовленных методом холодного вальцевания, предел усталостной прочности лежит в диапазоне от 50 до 40 кг/мм².

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ существующих технологий изготовления лопаток КВД для современных и перспективных конструкций компрессоров ГТД. Проведенный анализ показал, что на предприятиях отрасли отсутствуют единые подходы к выбору технологий изготовления лопаток КВД. На основании анализа опыта применения CALS-технологий в промышленности делается вывод, что одним из путей решения данных проблем может стать создание универсальной автоматизированной системы управления ТПП лопаток компрессора на основе CALS-технологий.

2. В результате проведенного исследования технологий изготовления лопаток КВД и технологической подготовки их производства разработана методика выбора технически обоснованной технологии производства лопатки КВД на основе ее конструктивных особенностей и с учетом требуемых технологических показателей ее качества. Так же при разработке методики учтены экономические показатели качества лопатки и технологическая наследственность операций обработки лопаток КВД. Порядок реализации этапов предложенной методики основан на общих принципах построения ТПП лопаток КВД.

3. С целью обеспечения функционирования универсальной автоматизированной системы управления ТПП лопаток компрессора была разработана методика организации процессов ТПП лопаток компрессоров ГТД на основе CALS-технологий с применением PLM/PDM систем для управления данными об изделии. Основой предложенной методики стал принцип обеспечения неразрывности конструкторских, технологических и экспериментальных данных на основании автоматизации процессов ТПП производства.

4. На основании разработанных методик реализована и проведена апробация универсальная автоматизированная система управления ТПП лопаток компрессора ГТД. Реализация системы произведена с помощью существующих коммерческих пакетов, построенных на принципах CALS-технологий CAD\CAM\CAE-системы NX и PLM-системы Teamcenter.

5. В результате проведенных работ по апробации универсальной автоматизированной системы управления ТПП лопаток компрессора ГТД в ней были реализованы технологические процессы изготовления лопаток КВД двигателя ВК-2500. Были исследованы два технологических процесса, которые должны обеспечить схожие технологический показатели качества лопатки. Один технологический процесс подразумевал окончательное формообразование пера лопатки методом холодного вальцевания и является аналогичным изготовлению подобных лопаток на предприятии (ОАО «ММП им. В.В.Чернышева»). Второй реализованный технологический процесс предусматривает формообразование пера лопатки методом фрезерования.

6. Образцы лопаток, изготовленные по обеим технологиям были исследованы на усталостную прочность. Также для исследуемых образцов были определены картины распределения остаточных напряжений в поверхностном слое:

- a. Проведенные исследования усталостной прочности лопаток компрессора ГТД показали, что предел усталостной прочности исследуемых лопаток, выполненных методом фрезерования из упрощенной штамповки составляет не менее $\sigma_{-1}=43$ кг/мм². Для аналогичных лопаток, изготовленных методом холодного вальцевания предел усталостной прочности лежит в диапазоне от 50 до 40 кг/мм².
- b. На поверхности профиля пера измерены благоприятные напряжения сжатия величиной 209 МПа, переходящие в растягивающие напряжения на глубине 12 мкм. Величина подслоиных растягивающих напряжений не превышает 24 МПа. Среднеквадратичное отклонение напряжений сжатия не превышает 70 МПа, напряжений растяжения - 10 МПа.
- c. На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что предложенные технологии позволяют получать изделия с аналогичными техническим параметрам качества и отвечают нормам предприятия и нормам ЦИАМ.

7. На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что предлагаемое решение по реализации универсальной автоматизированной системы управления ТПП лопаток компрессора позволяет: уменьшить время необходимое на ТПП, снизить количество ошибок и переделок на этапах ТПП и производства, снизить издержки при производстве и стоимость конечного изделия. Указанные результаты применения данной системы достигаются за счет: упрощения и ускорения доступа к необходимой службам предприятия информации, представления правильной и актуальной информации, оценки принимаемых технологических решений в условиях наличия всего необходимого объема технической и технико-экономической информации.

Предложенные методики и элементы автоматизированной системы управления ТПП внедряются в основное производство ОАО «ММП им. В.В.Чернышева», что подтверждается соответствующим актом внедрения.

Основные публикации по теме диссертационной работы

1. Ионов, А.В. Современные подходы к технологии изготовления лопаток плоской решетки с ТЛЖТ-рельефом поверхности для проведения экспериментальных исследований [Текст]/ А.В. Ионов, Л.Л. Картовицкий, Е.Ю. Марчуков, В.В. Терентьев, А.А. Яковлев // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань, 2011 г - №6 – с. 172-176.
2. Ионов, А.В. Проектирование и технология производства малых серий центробежных колес турбомашин из алюминиевых сплавов [Электронный ресурс] / В.А. Попов, Д.А. Катенин, С.В. Федосеев // Электронный журнал «Труды МАИ» - № 51 – 2012 г. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29141> (дата обращения 20.09.2014).
3. Ионов, А. В. Информационная поддержка разработки деталей турбокомпрессоров [Текст] / А. В. Ионов // Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева, Выпуск №2 – 2012 г. – С. 42-45.
4. Ионов, А.В. Проблемы выбора технологий производства лопаток компрессоров ГТД [Текст] / В.В. Терентьев, М.С. Болховитин. // Научно-технический журнал «Русский инженер» - выпуск №5 – 2012 г. – С. 44-47.
5. Ионов А.В. Повышение качества изготовления штамповой оснастки для компрессоров газотурбинных двигателей [Электронный ресурс] / М.С. Болховитин // Электронный журнал «Труды МАИ» - Выпуск №71 – 2013 г. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=46719> (дата обращения 20.09.2014).
6. Ионов, А.В. CALS-технологии в проектировании, технологической подготовке производства и производстве деталей турбокомпрессоров [Текст]/ А.В. Ионов В.В.Терентьев // 10-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2011»: Сборник тезисов докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2011. - С.150-151.

7. Ионов, А.В. Информационная поддержка разработки деталей турбокомпрессоров [Текст]/ А.В. Ионов / Будущее авиации за молодой Россией: Материалы Международного молодежного форума. – Рыбинск: РГАТУ имени П.А. Соловьева, 2012. - С.22-26.
8. Ионов, А.В. Проблемы выбора оптимальных технологий производства лопаток ГТД [Текст] / А.В Ионов. М.С. Болховитин // Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2012». Сборник тезисов докладов. – М.: ООО «Принт-салон». – 2012. - С.44-45.
9. Яковлев, А.А. Использование современных подходов при подготовке экспериментального исследования плоской решетки [Текст] / А.А. Яковлев, В.В. Терентьев, А.А. Матушкин, А.В. Ионов, Л.Л. Картовицкий, М.А. Щербаков // Материалы IX Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ 2012), Алушта. – М.: Из-во МАИ, 2012 – С. 125- 127.
10. Ионов, А.В. Повышение качества технологического процесса изготовления штамповой оснастки в производстве лопаток газотурбинного двигателя [Текст] / А.В Ионов. М.С. Болховитин // Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2013». Сборник тезисов докладов. – М.: ООО «Принт-салон». – 2013. С.156-157.