

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

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»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Новиков Александр Сергеевич

Москва 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. Анализ технологий производства лопаток компрессоров газотурбинных авиационных двигателей	12
1.1 Особенности компрессорных лопаток ГТД.....	12
1.1.1 Конструктивные схемы существующих и перспективных лопаток компрессоров ГТД	12
1.1.2 Материалы, применяемые при изготовлении лопаток компрессоров ГТД.....	15
1.1.3 Требования, предъявляемые к лопаткам компрессоров ГТД	16
1.1.4 Обзор методов изготовления компрессорных лопаток ГТД.....	18
1.1.5 Факторы, влияющие на выбор метода формирования пера лопаток компрессоров высокого давления ГТД.....	21
1.2 CALS-технологии в технологической подготовке производства (ТПП) лопаток компрессоров ГТД	24
1.2.1 Основные концепции CALS-технологий	24
1.2.2 Применение элементов CALS на этапе ТПП.....	28
1.2.3 Роль PDM\PLM систем при реализации концепций CALS	31
Глава 2. Методика выбора технически обоснованной технологии производства лопатки КВД.....	36
2.1 Показатели «назначения» качества лопатки КВД.....	36
2.2 Показатели надежности и технологические показатели качества лопатки КВД.....	37

2.3	Экономические показатели качества лопатки КВД.....	47
2.4	Порядок разработки технологии производства лопатки КВД 53	
2.4.1	Разработка классификатора конструкций	54
2.4.2	Порядок разработки маршрутной технологии.....	55
2.4.3	Учет технологической наследственности при разработке маршрутной технологии	57
2.4.4	Сравнительный анализ методов формообразования пера лопатки	58
2.4.5	Выбор технологии изготовления.....	59
Глава 3.	Методика организации процессов ТПП лопаток компрессоров ГТД на основе CALS-технологий	63
3.1	Структура базы данных.....	63
3.2	Управление доступом в БД	70
3.3	Управление конструкторскими и технологическими данными	72
Глава 4.	Универсальная автоматизированная система управления ТПП лопаток компрессора ГТД	77
4.1	Структура данных системы PDM. Модель данных PDM системы Teamcenter	77
4.1.1	Модель данных для конструкторской структуры изделия	78
4.1.2	Модель данных системы ТС для технологической структуры изделия и структура производственного процесса.....	82
4.2	Хранение экспериментальных данных	88
4.3	Хранение нормативно-справочной информации в ТС. Структура приложения «Классификатор».....	89

4.4	Инженерные бизнес-процессы (work-flow) в ТС.....	92
4.5	Экспериментальное исследование образцов	95
4.5.1	Исследование поверхностных остаточных напряжений в лопатках компрессора ГТД	95
4.5.2	Исследования усталостной прочности лопаток компрессора ГТД.....	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		116
Список использованной литературы		119

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в авиационном двигателестроении создается ситуация, когда уже в скором времени можно ожидать достижения теоретического предела совершенства параметров газотурбинного двигателя (ГТД). Одним из направлений конкурентной борьбы стало снижение стоимости жизненного цикла ГТД путем оптимизации процессов управления ЖЦИ, в том числе на этапе технологической подготовки производства.

По оценкам специалистов, трудоемкость изготовления и проведения технологической подготовки производства (ТПП) лопаток компрессора ГТД составляет до двадцати процентов от общей трудоемкости изготовления двигателя, из которых на долю компрессора высокого давления (КВД) приходится не менее семидесяти процентов трудоемкости изготовления лопаток компрессора.

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, слабо развит технико-экономический анализ предлагаемых и существующих технологий изготовления лопаток.

Одним из путей решения данных проблем может стать создание автоматизированной системы управления ТПП лопаток компрессора на основе CALS-технологий.

Актуальность исследования.

Существующие коммерческие программные решения позволяют реализовать автоматизированную систему управления ТПП 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-технологий (в последнее время более популярен стал термин PLM).

В отечественном авиационном двигателестроении большой вклад в развитие методологии внедрения и применения CALS-технологий внесли такие ученые, как А.Г. Братухин, И.А. Кривошеев, Д.Н. Елисеев, В.Н. Юрин и др.

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 применения такой системы можно ожидать применяя ее на уровне кооперации нескольких предприятий в рамках отрасли или ОДК. Создание и развитие такой системы может позволить 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 решение ряда 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.

Объектом исследования в данной работе будут являться процессы технологической подготовки производства лопаток КВД и их изготовления.

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

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

В первой главе проведен анализ существующих технологий производства лопаток компрессора газотурбинных авиационных двигателей, а также рассмотрены вопросы применения CALS-технологий в авиадвигателестроении. На

основе проведенного анализа сформулированы задачи, необходимые для достижения цели данной работы:

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.

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. Учитываются показатели относящиеся к показателям назначения, надежности, технологическим и экономическим показателям качества лопатки, а также рассматривается технологическая наследственность при производстве лопаток КВД. Предложенная методика строится с учетом порядков этапов ТПП и напрямую связана с процессом разработки маршрутной технологии.

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, используемых на этапе ТПП при производстве лопатки, а также данные экспериментальных исследований и данных по эксплуатации изделия. Классифицированы данные описывающие СТО, рассмотрены вопросы доступа к данным и управление конструкторскими и технологическими данными.

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. Экспериментальные образцы выполнены по серийной технологии с применением метода холодного вальцевания пера лопатки и по экспериментальной технологии с применением фрезерования пера. Образцы изготовлены на ОАО «ММП им. В.В. Чернышева». В ходе апробации методик и экспериментальных исследований лопаток подтверждена работоспособность универсальной автоматизированной системы управления технологической подготовкой производства лопаток компрессора ГТД.

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 ценность работы состоит в том, что разработанная автоматизированная система позволяет:

- собирать и хранить данных 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 и при использовании планирования 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.

Основным вкладом диссертанта 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.

Полученные результаты исследования докладывались на:

- 1) Конференция в рамках конкурса "Молодежь и будущее авиации и космонавтики". Москва, 2009 г.
- 2) 10-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2011», Москва, 2011 г.

- 3) Конференция в рамках конкурса «Молодежь и будущее авиации и космонавтики». Москва, 2011 г.
- 4) Международный молодежный форум «Будущее авиации за молодой Россией». Рыбинск, 2012 г.
- 5) Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2012», Москва, 2012 г.
- 6) Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2013», Москва, 2013 г.
- 7) «Будущее авиации и космонавтики за молодой Россией», МО, г. Жуковский, 2013 г.
- 8) Научных семинарах кафедры «Технология производства двигателей летательных аппаратов» МАИ (НИУ).

По теме диссертации опубликовано 13 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.

Основные положения, выносимые на защиту:

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 внедрению универсальная автоматизированная система управления ТПП лопаток компрессора ГТД.
4. Обработка результатов экспериментальных исследований лопаток КВД, выполненных по различным технологиям.

Глава 1. Анализ технологий производства лопаток компрессоров газотурбинных авиационных двигателей

1.1 Особенности компрессорных лопаток ГТД

1.1.1 Конструктивные схемы существующих и перспективных лопаток компрессоров ГТД

Размерно-конструктивный диапазон лопаток компрессора, изготавливаемых на предприятиях отрасли, достаточно широк [1-5]. Такое разнообразие объясняется тем, что для различных летательных аппаратов (вертолетов, военных, транспортных и пассажирских самолетов) изготавливаются различные ГТД — малой, средней, большой мощности. Они значительно различаются геометрическими и термодинамическими параметрами, которые определяют конструкцию лопаток.

Основными конструктивными элементами лопаток являются: перо, хвостовик, полки пера и хвостовика, антивибрационные и бандажные полки.

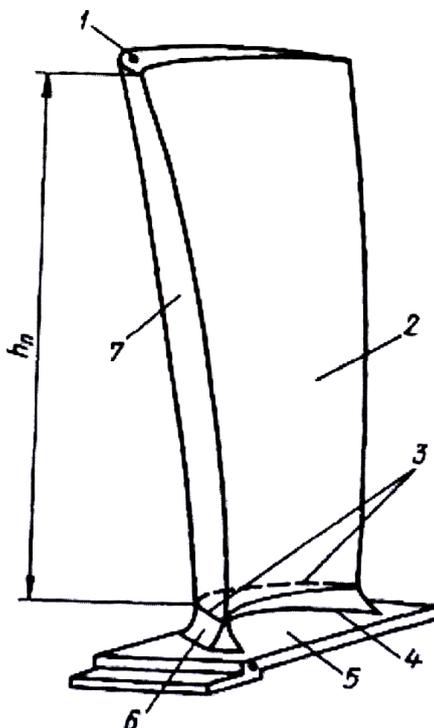


Рисунок 1. Перо лопатки с полкой хвостовика: 1 - торец пера; 2 - корыто; 3 - линия сопряжения переходной части лопатки с пером; 4- линия сопряжения переходной части лопатки с полкой; 5 - полка хвостовика; 6- переходная часть пера; 7- спинка; h_m , - высота пера.

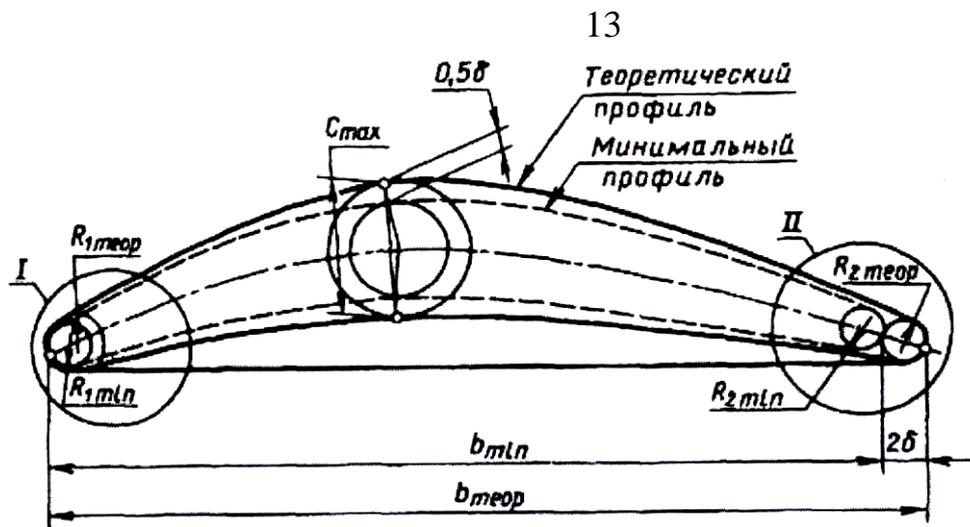


Рисунок 2. Профиль пера лопатки.

Лопатки компрессора являются наиболее массовыми деталями. Число ступеней лопаток в осевых компрессорах доходит до 18, а число лопаток в мотор-комплексе может быть более 1500 (рисунок 3).

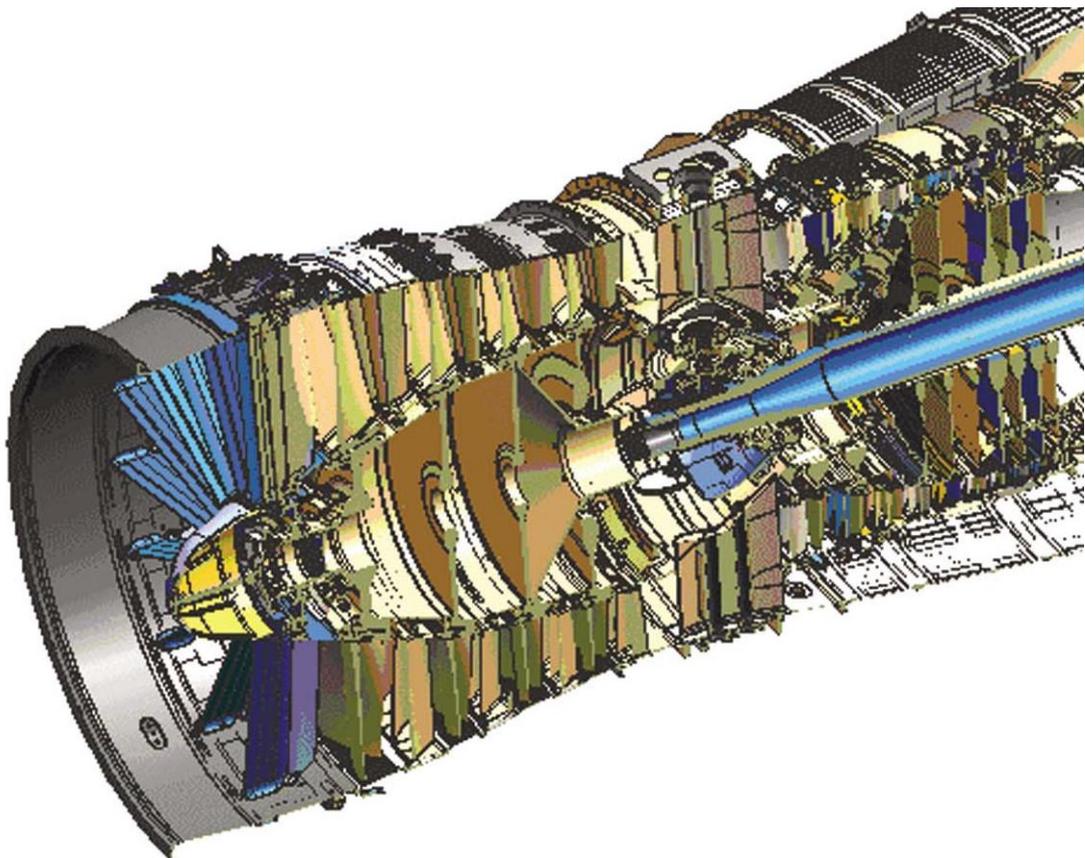


Рисунок 3. Компрессор ГТД в разрезе [20].

Конструкции лопаток компрессора разнообразны (см. рисунок 4,5). Для разных двигателей их параметры изменяются в широком диапазоне. Существуют проекты различных новых конструкций лопаток [8,9].

Длина лопаток может быть от 15 до 850 мм, ширина пера (хорда) 7...280 мм, закрутка пера до 60° . Основную номенклатуру лопаток компрессоров составляют лопатки длиной от 30 до 120 мм [6].

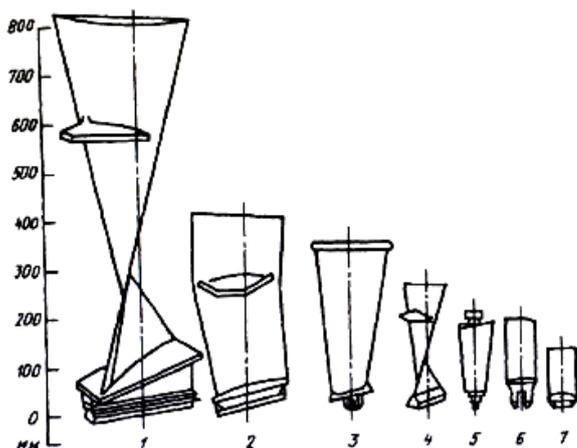


Рисунок 4. Сравнительная длина лопаток компрессора.



Рисунок 5. Лопатки двигателя пятого поколения.

По своему назначению лопатки компрессора подразделяются на рабочие лопатки ротора (рисунок 5) и лопатки статора (рисунок 6).

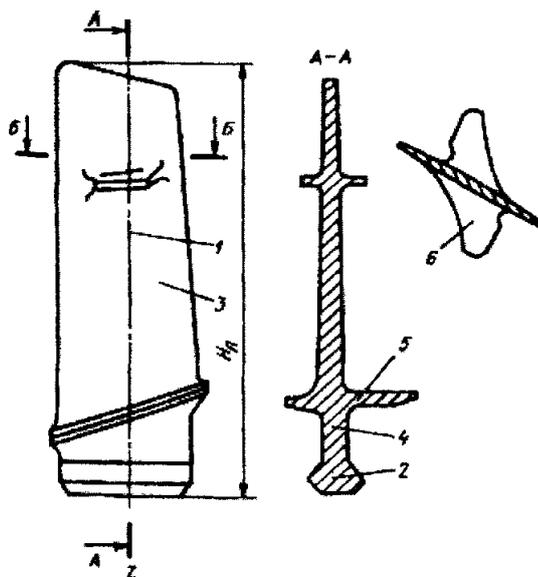


Рисунок 6. Рабочая лопатка ротора компрессора: 1 - ось лопатки; 2 - хвостовик; 3- перо; 4 - ножка хвостовика; 5 - полка хвостовика; 6 — антивибрационная полка; лл - длина лопатки

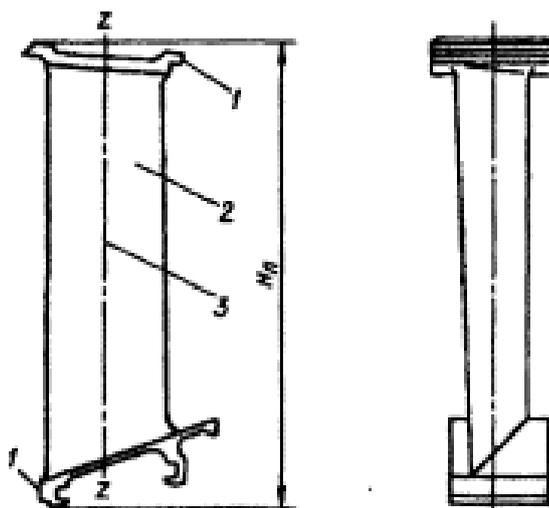


Рисунок 7. Направляющая лопатка статора компрессора: 1- хвостовик лопатки; 2 - перо лопатки; 3 - ось лопатки; $H_{л}$ — длина лопатки

Основными конструктивными параметрами, влияющими на технологию изготовления лопаток компрессора, являются их габаритные размеры, формы хвостовика и пера, предельные допуски на отклонения поверхностей пера и хвостовика, шероховатость этих поверхностей, толщина и радиусы скругления кромок, радиусы сопряжения пера с полкой, материал лопаток.

1.1.2 Материалы, применяемые при изготовлении лопаток компрессоров ГТД

Для изготовления лопаток компрессора в основном используются легированные стали и титановые сплавы. Применение алюминиевых сплавов ограничено, что в основном объясняется их невысокой жаропрочностью [1].

Условия работы лопаток компрессоров определяют требования к материалам, из которых они изготавливаются. Лопатки должны сохранять работоспособность при температурах до 800°C , а также обладать повышенной коррозионной стойкостью. Характерное свойство теплостойких коррозионностойких сталей и сплавов - сопротивление коррозии, что обусловлено, главным образом, наличием в их составе хрома. Свойство хрома повышать коррозионную стойкость связано с его способностью образовывать на поверхности

металла защитный непроницаемый слой окиси, нерастворимый в агрессивных коррозионных средах. Для изготовления лопаток компрессоров наиболее широко используются коррозионностойкие стали и сплавы 1X17H2 (ЭИ268), 13X14HВФРЛ (ЭИ736), 1X12H2ВМФ (ЭИ961), ЭП-718ИД и др. [6,7].

Применение для изготовления лопаток компрессоров титановых сплавов обусловлено рядом их преимуществ перед другими конструкционными материалами, главное из которых состоит в том, что высокие механические свойства и коррозионная стойкость титановых сплавов сочетаются с малым удельным весом. Титановые сплавы по удельной прочности при температурах до 500 °С превосходят большинство жаропрочных сталей [10,11], что позволяет значительно уменьшить массу двигателя, обладают термической стабильностью и не охрупчиваются при длительной работе в условиях нагрева до 500 °С. Кроме того, титановые сплавы достаточно хорошо обрабатываются резанием. Наибольшее распространение при изготовлении лопаток компрессоров получили сплавы ВТЗ-1, ВТ5, ВТ8, ВТ9, ВТ18, ОТ4.

1.1.3 Требования, предъявляемые к лопаткам компрессоров ГТД

Перо лопаток компрессора относительно тонкое со значительным перепадом по толщине от концевое к корневому сечению, а также малой кривизной (большим радиусом окружности, вписанной в профиль поперечного сечения). Точность изготовления пера лопаток регламентируется отраслевым стандартом ОСТ 1.02571-86 "Лопатки компрессоров и турбин. Предельные отклонения формы и расположения пера" [5].

Стандарт распространяется на лопатки роторов и статоров компрессоров и турбин ГТД, выполняемые с отдельным хвостовиком, секциями, зацело с диском или ободом, при изготовлении которых применяются механическая обработка, вальцевание, штамповка, литье, а также сочетание этих технологических процессов.

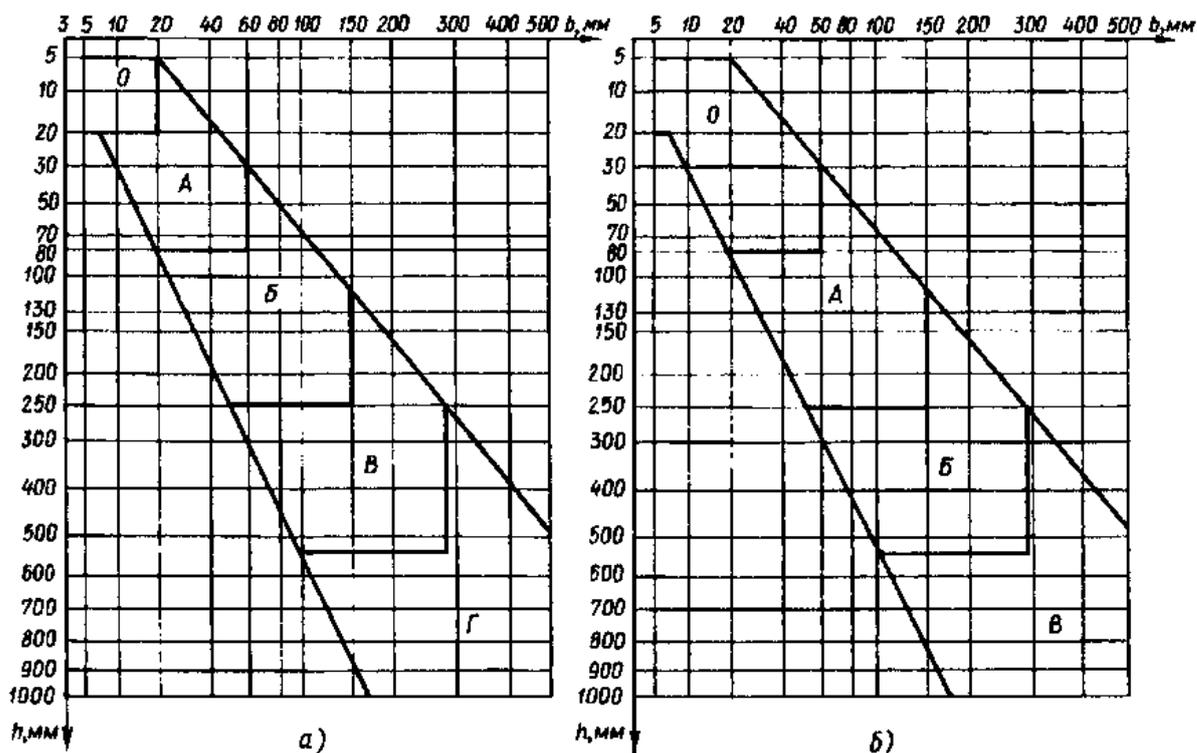


Рисунок 8. Размерные группы дозвуковых (а) и сверхзвуковых (б) лопаток компрессора: b - ширина (хорда) пера, h - высота пера

Предельные отклонения размеров профиля пера лопаток компрессора от теоретического профиля должны назначаться в зависимости от группы (рис.1.8), к которой относится лопатка, в соответствии с табл. 1 и графиками, представленными на рисунке 8 для дозвуковых и сверхзвуковых лопаток. Группы лопаток определяются размерами лопаток по высоте и ширине.

Таблица 1. Предельное отклонение максимальной толщины S_{max} профиля 0,56 со стороны спинки (корыта), мм

Группа лопаток	Класс точности		
	1	2	3
0	-0,04	-0,06	-0,08
A	-0,06	-0,08	-0,12
Б	-0,08	-0,16	-0,24
B	-0,24	-0,32	-0,48
Г	-0,52	-0,72	-0,92

Согласно стандарту отклонения профилей пера в зоне кромок в расчетных точках входная кромка, спинка и корыто, выходная кромка должны составлять 0,25 для дозвуковых и 0,125 для сверхзвуковых лопаток.

Предельные отклонения угла установки профиля лопаток компрессора лежат в диапазоне $\pm 15' \dots \pm 30'$ в зависимости от размерной группы лопаток и должны выбираться по соответствующей таблице ОСТа. Допустимое смещение фактического профиля в корневом сечении в направлении оси Y должно находиться в пределах $\pm 0,1 \dots \pm 0,5$ мм в зависимости от размерной группы лопаток.

Существенным недостатком документации по стандартизации лопаток является отсутствие отраслевых стандартов на шероховатость их проточных поверхностей. Она назначается конструкторами и для лопаток компрессоров различных двигателей Ra находится в пределах 0,63...0,08 мкм. Так же отсутствуют четкие нормы на распределение напряжений в поверхностном слое, структуру поверхностного слоя.

1.1.4 Обзор методов изготовления компрессорных лопаток ГТД

Рассматривая методы и технологические процессы изготовления лопаток компрессоров следует отметить, что сходные лопатки, как правило, на разных заводах изготавливаются разными методами с помощью различных средств, значительно различаются по технико-экономическим показателям (по трудоемкости, технологической себестоимости, приведенным затратам) и технологии изготовления. Это существенный недостаток, он должен устраняться на базе типизации технологических процессов, при которой сходные по своим конструктивно-технологическим характеристикам лопатки следует обрабатывать с помощью единого процесса, обеспечивающего лучшие технико-экономические показатели.

С учетом конструктивно-технологических особенностей выделены три размерные группы лопаток: с высотой до 120 мм, 120...250 мм, 250...850 мм [6].

С учетом определяющих операций по обработке пера, типов хвостовиков, а также передового опыта предприятий отрасли и перспективных направлений

совершенствования технологии производства лопаток компрессора укрупненно можно выделить следующие технологические группы лопаток.

1. Высота пера до 120 мм, один хвостовик типа "ласточкин хвост". Припуск по перу 0,2...0,6 мм. Обработка профиля хвостовика протягиванием или точением для кольцевых хвостовиков.

Используются три технологические схемы обработки пера с определяющими операциями: вальцевание; шлифование; ЭХО.

2. Высота пера 120...250 мм, один хвостовик типа "ласточкин хвост". Припуск по перу 1,5...2,5 мм. Обработка профиля хвостовика протягиванием.

Используются три технологические схемы обработки пера с определяющими операциями: фрезерование+шлифование; ЭХО+шлифование; ЭХО.

3. Высота пера 250...850 мм, один хвостовик типа "ласточкин хвост" или "елка". Припуск по перу 5,5...20 мм. Обработка профиля хвостовика протягиванием или фрезерованием для "елочных" хвостовиков.

Используются две технологические схемы обработки пера с определяющими операциями: фрезерование+шлифование; фрезерование+ЭХО+шлифование.

4. Высота пера до 120 мм, один хвостовик типа "цапфа". Припуск по перу 0,2...0,6 мм. Обработка цилиндрической полки хвостовика и хвостовика типа "цапфа" точением.

Используются две технологические схемы обработки пера с определяющими операциями: вальцевание; шлифование.

5. Высота пера 120...250 мм, один хвостовик типа "шарнир". Припуск по перу 1,5...2,5 мм. Обработка хвостовика сверлением, фрезерованием и протягиванием.

Используются три технологические схемы обработки пера с определяющими операциями: фрезерование+шлифование; ЭХО+шлифование; ЭХО.

6. Высота пера до 120 мм, два хвостовика типа "призматическая полка". Припуск по перу 0,2...0,6 мм. Обработка наружных поверхностей полок протягиванием.

Используются две технологические схемы обработки пера с определяющими операциями: шлифование; ЭХО.

7. Высота пера 120...250 мм, два хвостовика типа "призматическая полка". Припуск по перу 1,5...2,5 мм. Обработка наружных поверхностей полок протягиванием.

Используются три технологические схемы обработки пера с определяющими операциями: фрезерование+шлифование; ЭХО+шлифование; ЭХО.

8. Высота пера до 120 мм, два хвостовика типа "цапфа". Припуск по перу 0,2...0,6 мм. Обработка цилиндрических полок хвостовиков и хвостовиков типа "цапфа" точением.

Используются две технологические схемы обработки пера с определяющими операциями: шлифование; ЭХО.

9. Высота пера 120...250 мм, два хвостовика типа "цапфа". Припуск по перу 1,5...2,5 мм. Обработка цилиндрических полок хвостовиков и хвостовиков типа "цапфа" точением.

Используются три технологические схемы обработки пера с определяющими операциями: фрезерование+шлифование; ЭХО+шлифование; ЭХО.

10. Высота пера до 120 мм, без хвостовиков переменного профиля. Припуск по перу 0,2...0,6 мм. Обработка технологического хвостовика протягиванием.

11. Высота пера до 120 мм, без хвостовиков постоянного профиля. Определяющие операции: разделение профильной полосы на отдельные заготовки; гибка отдельных заготовок; безразмерная обработка пера.

Существуют различные оценки, обосновывающие выбор конкретной технологии изготовления [2,6,7,9,10,12]. Как отмечалось выше, оценки эти носят

субъективный характер и зависят от конкретного предприятия. Тем не менее можно выделить несколько тенденций в производстве лопаток компрессоров. Развитие технологий создания высокопроизводительного механообрабатывающего оборудования приводит к тому что для вновь создаваемых изделий все большее применение находит многокоординатная фрезерная обработка. С учетом меньших серийностей выпуска и большей номенклатуры видов лопаток производители отказываются от сложных в технологической подготовке точной штамповки и ЭХО в пользу менее производительной, но гораздо проще и быстрее внедряемой технологии фрезерования. В тоже время, на российских [13-16] предприятиях все больше внимание уделяется на повышение производительности и точности обработки при ЭХО и точной штамповке. Наблюдается планомерный процесс перехода предприятий на одну-две основные технологические цепочки изготовления с постепенным отказом от менее эффективных в условиях предприятия методов обработки.

1.1.5 Факторы, влияющие на выбор метода формирования пера лопаток компрессоров высокого давления ГТД

Технологические цепочки изготовления замков и полок лопаток компрессоров высокого давления хорошо отработаны и на предприятиях выбор метода их обработки основан на существующих методах практически одинаковых на предприятиях в России и за рубежом [2,3]. Здесь основные отличия связаны с имеющимся оборудованием и инструментом, а также зависит от необходимой производительности и объема выпуска продукции. Выбор финишных операций таких как упрочняющая обработка и нанесение покрытий во многом определяются имеющимся на предприятии оборудованием, степенью освоенности новых технологических методов и состояния научной работы на предприятии проводимой в этом направлении. Для большинства существующих лопаток КВД эти технологии являются директивными. Основные сложности для выбора, а как следствие и возможность оптимизации представляют методы формообразования пера лопатки. По трудоемкости обработка пера составляет от 40 до 70% от общей

трудоемкости изготовления лопатки (такие выводы можно сделать после анализа технологической документации на различные виды лопаток изготовленных на различных предприятиях).

Приступая к исследованию проблемы выбора методов формирования пера лопаток КВД необходимо определить какие технические факторы могут влиять на выбор тех или иных технологических операций (подробно эти факторы будут рассмотрены в главе 3).

В первую очередь необходимо выделить факторы, обусловленные конструкцией лопатки. Эти факторы во многом ограничивают возможность применения некоторых из возможных методов обработки. К таким конструктивным особенностям относятся полки – их наличие не позволяет использовать для черновой и чистовой обработки метод вальцевания [7] и сильно ограничивает применение ЭХО [13]. Увеличение угла закрутки пера свыше 45° делает не целесообразным применение штамповки для фасонирования заготовки [7]. Так же большое влияние на выбор метода обработки пера оказывает форма входных и выходных кромок лопатки. Для лопаток КВД новых конструкций характерна сложная пространственная форма кромок, связанная с сильным изменением хорды по сечениям, это означает что применение вальцевания для чистовой обработки таких лопаток невозможно. Оценка влияния конструктивных особенностей лопаток на технологию изготовления позволяет на ранних этапах разработки конструкции и технологической подготовки производства (ТПП) оценить технологические особенности изготовления.

Следующей группой факторов, влияющих на формирование ТП изготовления лопатки компрессора являются конструктивно-технологические требования закладываемые на этапе проектирования конструкции. К таким требованиям относятся размеры изделия, материал, шероховатости поверхностей, предельные отклонения.

При формировании ТП изготовления лопатки КВД так же необходимо учитывать влияние различных видов обработки на физико-химическое состояние поверхности и детали в целом. Для лопаток КВД при их небольших толщинах

состояние поверхностного слоя играет важную роль в обеспечении прочностных и эксплуатационных свойств. И в завершении фактор, который не относится ни к одной из вышеизложенных групп – это технологическая наследственность.

Обоснованный выбор вариантов технологического процесса можно сделать обладая доступом к большому количеству данных получаемых различными методами из большого количества источников. Данные по влиянию методов обработки на физико-химическое состояние поверхности получают как-правило путем проведения большого количества экспериментальных исследований на образцах или серийных деталях. В свою очередь для того что бы определить характер влияния того или иного физико-химического состояния поверхности на эксплуатационные свойства детали необходимо так же проведение исследований, в том числе со сбором статических данных по результатам эксплуатации изделия или аналогичных ему изделий.

Кроме того, для разработки новых изделий необходимы инструменты прогнозирования влияния применения новых технологий и методов обработки для существующих изделий и при проектировании новых конструкций. Если раньше сбором и обработкой этой информации занимались научно-исследовательские институты, результатами работы которых были отраслевые стандарты и рекомендации, то сейчас такую работу приходится вести производителям и разработчикам изделий, в том числе при широкой кооперации поставщиков комплектующих.

С учетом отсутствия в мировой практике [1] и на отечественных заводах отрасли единых подходов к изготовлению однотипных лопаток необходимо проводить на этапе технологической подготовки производства формирование технологических процессов с учетом технически обоснованных критериев, и что даже более важно, это должно проводится при экономическом обосновании всех принятых решений.

1.2 CALS-технологии в технологической подготовке производства (ТПП) лопаток компрессоров ГТД

Современное производство сложных изделий машиностроения подразумевает согласованную работу многих предприятий. Для обеспечения согласованной работы всех предприятий, участвующих в проектировании, производстве, реализации и эксплуатации изделий, используется соответствующая информационная поддержка этапов жизненного цикла изделий. Такая поддержка и компьютерное сопровождение жизненного цикла изделия получили название CALS (Continuous Acquisition and Lifecycle Support). Назначение CALS-технологий - обеспечивать представление необходимой информации в нужное время, в нужном виде, в конкретном месте любому пользователю на всех этапах жизненного цикла изделия. Внедрение CALS-технологий в ближайшие годы станет необходимым условием выживания промышленных предприятий при существующей жёсткой конкуренции товаров на международных и национальных рынках [1].

1.2.1 Основные концепции CALS-технологий

В современных условиях участниками жизненного цикла конкретного изделия могут быть юридически и территориально не связанные друг с другом предприятия. CALS-технологии призваны служить средством, интегрирующим существующие на предприятиях автоматизированные системы обработки информации в единую функциональную систему. Главная задача создания и внедрения CALS-технологий - обеспечение единообразных описаний и смысловой интерпретации данных независимо от места и времени их получения в общей системе, имеющей масштабы вплоть до глобальных. CALS-технологии не отвергают существующие автоматизированные системы обработки информации (САПР, АСТПП, АСУ, АСУП и др.), а служат средством их интеграции и эффективного взаимодействия. При этом структура проектной, технологической и эксплуатационной документации, понятийный аппарат и языки представления данных должны быть стандартизованы [17-19].

По аналогии с системами автоматизированного проектирования в составе CALS различают лингвистическое, информационное, математическое,

программное, методическое, техническое и организационное обеспечение системы.

К лингвистическому обеспечению CALS относятся языки и форматы данных о промышленных изделиях и процессах, используемые для представления и обмена информацией на всех этапах жизненного цикла изделий.

Информационное обеспечение составляют базы данных, содержащие сведения о промышленных изделиях, используемые различными системами в процессе проектирования, производства, эксплуатации и утилизации изделий. В состав информационного обеспечения входят также серии международных и национальных CALS-стандартов и спецификаций.

Математическое обеспечение CALS включает, модели и алгоритмы взаимодействия различных систем и их компонентов в CALS-технологиях. К этим моделям относятся методы структурного и имитационного моделирования, методы планирования и управления процессами, распределения ресурсов и т.п.

Программное обеспечение CALS представлено программными комплексами, предназначенными для поддержки единого информационного пространства на всех этапах жизненного цикла изделий. Это системы управления документами и документооборотом, управления проектными данными, взаимодействия предприятий в электронном бизнесе, подготовки интерактивных электронных технических руководств и некоторые другие.

Методическое обеспечение CALS представлено методиками выполнения таких процессов, как структурирование сложных объектов, их функциональное и информационное моделирование, параллельное (совмещенное) проектирование и производство, объектно-ориентированное проектирование, создание онтологии приложений.

К техническому обеспечению CALS относят аппаратные средства получения, хранения, обработки и визуализации данных при информационном сопровождении изделий. Взаимодействие частей виртуальных предприятий, систем, поддерживающих разные этапы жизненного цикла изделий, происходит через линии передачи данных и сетевое коммутирующее оборудование.

Следует отметить, что технические средства, используемые в CALS, не являются специфическими, предназначенными только для CALS-технологий. Специфическими являются прежде всего средства лингвистического, математического и программного обеспечения CALS, а также международные CALS-стандарты, регламентирующие средства информационного и методического обеспечения. Основные типы автоматизированных систем обработки информации в CALS, используемых в жизненном цикле изделия, представлены на рисунке 9. Эти системы поддерживают следующие этапы и процедуры в жизненном цикле:



Рисунок 9. Этапы жизненного цикла промышленных изделий и системы их автоматизации

- CAE - Computer Aided Engineering (автоматизированные рас-четы и анализ);
- CAD - Computer Aided Design (автоматизированное проектирование);
- CAM - Computer Aided Manufacturing (автоматизированная технологическая подготовка производства);
- PDM - Product Data Management (управление проектными данными);
- ERP - Enterprise Resource Planning (планирование и управление предприятием);
- MRP-2 - Manufacturing (Material) Requirement Planning (планирование производства);

- MES - Manufacturing Execution System (производственная исполнительная система);
- SCM - Supply Chain Management (управление цепочками поставок);
- CRM - Customer Relationship Management (управление взаимоотношениями с заказчиками);
- SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition (диспетчерское управление производственными процессами);
- CNC - Computer Numerical Control (компьютерное числовое управление);
- S&SM - Sales and Service Management (управление продажами и обслуживанием);
- CPC - Collaborative Product Commerce (совместный электронный бизнес).

Перечисленные автоматизированные системы могут работать автономно, и в настоящее время так обычно и происходит. Однако эффективность автоматизации будет заметно выше, если данные генерируемые в одной из систем, будут доступны в других системах, поскольку принимаемые в них решения станут более обоснованными.

Чтобы достичь должного уровня взаимодействия промышленных автоматизированных систем, требуется создание единого информационного пространства не только на отдельных предприятиях, но и, что более важно, в рамках объединения предприятий. Единое информационное пространство обеспечивается благодаря унификации как формы, так и содержания информации о конкретных изделиях на различных этапах их жизненного цикла.

Унификация формы достигается использованием стандартных форматов и языков представления информации в межпрограммных обменах и при документировании.

Унификация содержания, понимаемая как однозначная правильная интерпретация данных о конкретном изделии на всех этапах его жизненного цикла,

обеспечивается разработкой онтологий (мета-описаний) приложений, закрепляемых в прикладных CALS-протоколах.

Одной из важнейших проблем CALS-технологий является обеспечение единого смыслового содержания данных при использовании их на различных этапах жизненного цикла изделия. Классические подходы к реализации СУБД имеют весьма ограниченные семантические возможности. Они очень мало говорят о реальном смысловом значении данных и семантических требованиях к ним. Важность этой проблемы в CALS обусловлена тем, что различные системы могут использовать одни и те же данные - данные об одних и тех же объектах - но с разных точек зрения, при этом одни и те же данные могут использоваться в одно и то же время при параллельном решении разных задач. Поэтому в CALS технологиях широко используются концептуальные модели данных, которые в большей степени отражают смысловое содержание информации.

1.2.2 Применение элементов CALS на этапе ТПП

Как говорилось выше, на этапе ТПП необходимо проводить оценку большого количества данных имеющих различные источники и форму представления. Если описывать ТПП при помощи методологии функционального моделирования IDEF [21, 22] с точки зрения применения блок ТПП (так называемый уровень А-0) примет вид – рисунок 10.



Рисунок 10. Диаграмма уровня А-0.

На следующем уровне декомпозиции процесса ТПП рассмотрим какой информацией пользуются участники процесса и какой результат получают в результате своей работы.

Основой для проектирования ТП изготовления является комплект конструкторской документации. На первом этапе технологическими службами предприятия (А1, рисунок 11) проводится анализ КД на технологичность и выработка рабочего варианта МТ (маршрутной технологии). При проектировании МТ как правило используются существующие технологии изготовления лопатки с похожими конструктивными особенностями [7]. Все предприятия авиационной отрасли имеют свою специфику организации работы поэтому, в общем случаи как наиболее распространенный, рассмотрим вариант, когда МТ проектирует служба главного технолога, а собственно пооперационное описание техпроцесса, назначение оборудования, инструмента, расчет норм и т.д. осуществляется непосредственно в цехах предприятия [23,24]. В цехе, основываясь на опыте выполнения технологических операций по выпуску аналогичных лопаток, проводят работу по разработке комплекта технологической документации на операции закрепленные за цехом. Технологами цеха определяется парк основного оборудования, инструмента и оснастки, приспособлений, необходимый для реализации МТ. В случаи необходимости покупки или разработки недостающих средств технологического оснащения (СТО) по установленным процедурам эта информация передается по службам предприятия. На основании запросов цехов формируется перечень СТО закупаемых или разрабатываемых на предприятии. Соответственно на этапе разработки СТО необходимо проведения всего объема работ, предусмотренных для проектирования и ввода в эксплуатацию новых видов оборудования и инструмента.

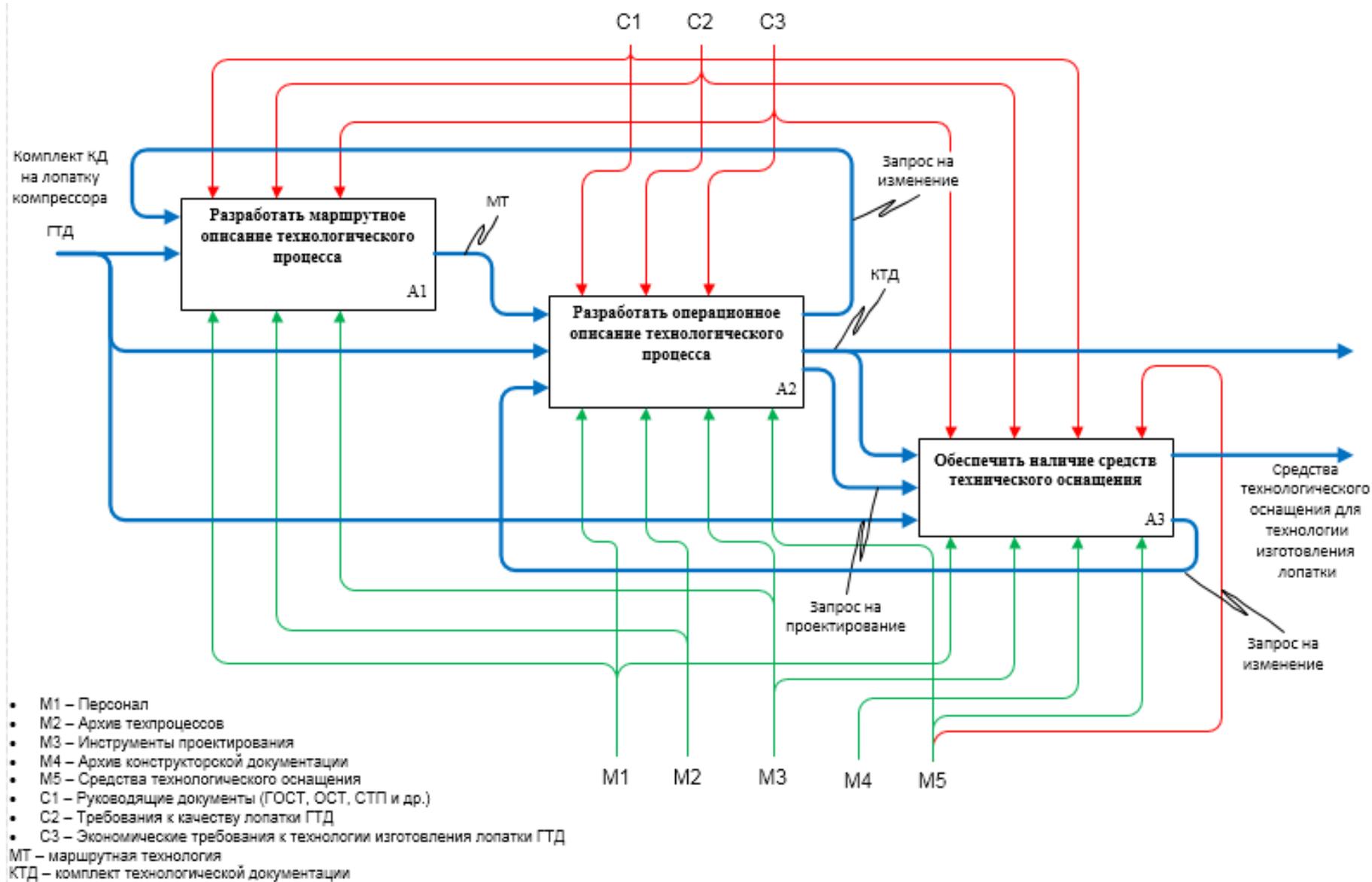


Рисунок 11. Диаграмма процесса ТПП.

Теперь рассмотрим какие из подходов CALS применяются на этапе ТПП при изготовлении лопаток компрессоров в настоящее время.

Одним из направления применения CALS-технологий является автоматизирование части функций, которые раньше выполнял человек [25,26-29,31]. Выпуск большого количества технологической документации обусловил первое направление автоматизации – формирование и заполнение типовых бланков с описанием операций и переходов. В настоящий момент такие системы развились и сформировали отдельный класс систем CAPP (англ. computer-aided process planning) — средства автоматизации планирования технологических процессов, применяемые на стыке систем CAD и CAM. По средствам CAD происходит оформление эскизов и моделей, CAM системы позволяют готовить управляющие программы, а собственно CAPP система отвечает за связывание этих данных по средством маршрутных или операционных описаний через общую базу данных [18,19], в которой могут храниться и данные по СТО. Примерами реализации таких систем являются система TECHCARD (компания Интермех) которая широко распространена на отечественных предприятиях.

Второе направление автоматизации на этапе ТПП связано с внедрением в технологические цепочки лопаточного производства программно-управляемого оборудования (станки с ЧПУ). Написание программ для этого оборудования требует наличия трехмерных моделей не только на собственно лопатку, но и моделей на отдельные технологические операции и СТО. Здесь наряду с системами CAM широко используются CAD системы для моделирования.

Еще одной областью в которой активно применяются информационные системы является ведение различных справочников и каталогов. Каталогизация необходима для ведения перечней оборудования, инструментов, материалов и др. Для этого применяются различные системы для управления базами данных от Access (Microsoft) до Oracle, а также системы ERP\MRP-2 [19].

1.2.3 Роль PDM\PLM систем при реализации концепций CALS

Ключевую роль при построении единых информационных систем, реализующих принципы CALS играют системы PDM\PLM. Здесь разница систем PDM и PLM состоит в том, что PDM охватывает только один этап жизненного цикла изделия, в то время как PLM система реализует управление всеми этапами ЖЦИ. PLM системы более сложны в использовании, более дороги, но в тоже время обладают большим функционалом и адаптивностью к задачам по сравнению с системами PDM.

PLM имеет в своей основе основные принципы [1,22,32,33]:

1. Универсальный, безопасный, управляемый доступ и использование информации о продукте на всех этапах ЖЦИ.
2. Целостное и актуальное информационное описание изделия на всем протяжении ЖЦИ.
3. Управление бизнес-процессами, создания, управления, распространения, обмена и использования информации об изделии.

Применение компьютерной технологии проектирования и технологической подготовки производства должно обеспечить:

- Интенсификацию проектных работ и сокращение срока проектирования изделий;
- Проведение одновременного проектирования различных процессов технологической подготовки производства;
- Сокращение объема доводок;
- Сокращение сроков проектирования и доводки оснастки;
- Минимизацию подгонки при сборке;
- Увеличение количества управляющих программ и сокращение сроков создания программ для станков с ЧПУ;
- Повышение качества проектных работ и документации;
- Упрощение процесса сертификации качества изделий;
- Повышение конкурентоспособности продукции;

- Систематизацию управления базами (архивами) данных (конструкция, технология).

Системы управления инженерными данными PDM в последнее время, ввиду расширения функциональных возможностей таких систем, стали называться РКМ (Product Knowledge Management) [32].

Эти объектно-ориентированные системы управляют всеми знаниями об изделии на протяжении всего жизненного цикла от проектирования и производства до снятия с эксплуатации. Это, прежде всего, спецификации, в которых на основе формируемых конфигурационных правил отслеживаются различные модификации и исполнения изделия, а также любая другая информация (например, технические условия, данные по маркетингу и эксплуатации, руководства, отслеживание ресурсов, ремонты и т.д.). Кроме того, с помощью этих систем осуществляется управление процессом проектирования (выдача заданий, создание процедур разработки, контроль текущего состояния, утверждение, электронные подписи и др.).

Выводы по главе.

По оценкам специалистов, трудоемкость изготовления и проведения технологической подготовки производства (ТПП) лопаток компрессора ГТД составляет до 30% от общей трудоемкости изготовления двигателя, из которых на долю компрессора высокого давления (КВД) приходится не менее 70% трудоемкости изготовления лопаток компрессора.

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, слабо развит

технико-экономический анализ предлагаемых и существующих технологий изготовления лопаток.

Одним из путей решения данных проблем может стать создание автоматизированной системы управления ТПП лопаток компрессора на основе CALS-технологий.

Существующие коммерческие программные решения позволяют реализовать автоматизированную систему управления ТПП лопаток КВД. Такая система должна быть неотъемлемой частью глобальной системы управления ЖЦИ которые сейчас строятся на основе принципов CALS-технологий.

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 для 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 эффекты 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 применения такой системы можно ожидать применяя ее на уровне кооперации нескольких предприятий в рамках отрасли или ОДК. Создание и развитие такой системы может позволить 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 решение ряда 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.

Глава 2. Методика выбора технически обоснованной технологии производства лопатки КВД

Как было отмечено выше при формировании технологического процесса изготовления лопатки компрессора ГТД необходимо учитывать большое количество факторов и ограничений. В управлении качеством продукции [34] вводятся показатели качества продукции, которые разделены на группы. Существуют общие методы группировки, и терминология, используемая при их описании [34,35]. На основе предлагаемых показателей качества можно составить перечень показателей, характеризующих лопатку ГТД (рисунок 12).

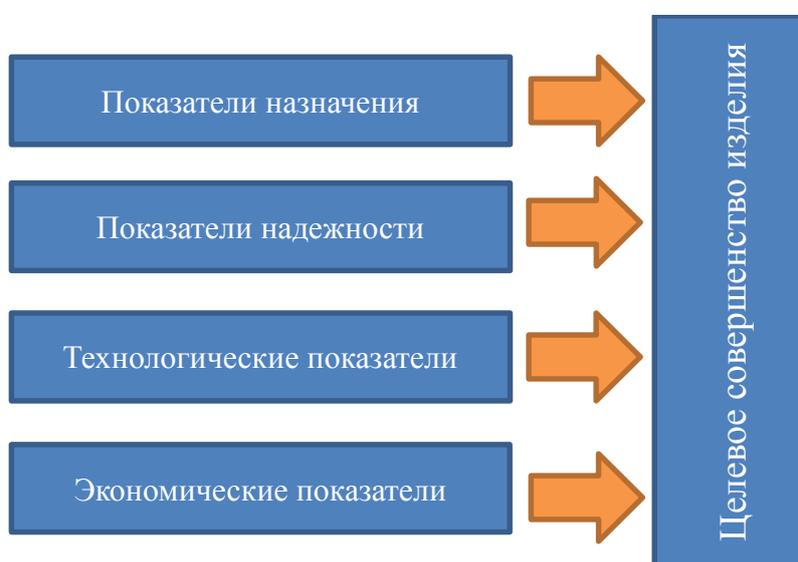


Рисунок 12. Показатели качества лопаток КВД.

2.1 Показатели «назначения» качества лопатки КВД

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 (Таблица 2).

Таблица 2. Влияние показателей назначения на ТП.

№	Конструктивный признак	Ограничение
1.	Наличие верхней полки или хвостовика (статорная лопатка), антивибрационной полки	Невозможно вальцевать перо
2.	Угол закрутки пера свыше 45°	Невозможно вальцевать перо, для групп лопаток В, Г ограничено применение ЭХО
3.	Сильное изменение длины хорды по сечениям	Невозможно вальцевать перо
4.	Для групп лопаток В, Г	Нецелесообразно применение ЭХО
5.	Шероховатость менее Ra 0,32	Необходима полировка

2.2 Показатели надежности и технологические показатели качества лопатки КВД

Ресурс изделия основной показатель надежности для лопатки компрессора ГТД. На ресурс лопатки влияют несколько факторов [1,6,7,36,37]. В первую очередь ресурс обеспечивается совершенством конструкции детали и правильностью выбора материала детали, эти факторы обеспечиваются на этапе конструкторской проработки. Во вторую очередь обеспечение надежности изделия обеспечивается технологическими показателями качества.

Немало важным фактором, влияющим на надежность лопатки является технологическое обеспечение заданных допусков и структуры материала детали. Сильное влияние на конструктивную прочность рабочей лопатки оказывает место перехода пера лопатки к замкам и полкам, структура и шероховатость поверхностного слоя, внутренняя структура материала, коррозионная стойкость поверхности лопатки, сопротивление фреттинг-износу поверхностей замков и полок. Рассмотрим эти вопросы подробнее.

Основными параметрами лопатки компрессора обеспечиваемых технологически и от которых зависит газодинамическое совершенство лопатки являются – шероховатость поверхности и размеры входной кромки лопатки.

Рассмотрим теперь влияние некоторых геометрических параметров на потери в решетке.

Полученные при продувке плоских пакетов профилей расчетные и экспериментальные характеристики относятся к аэродинамически гладким поверхностям.

Для характеристики состояния поверхностей лопаток вводится относительная шероховатость [1]

$$\overline{k_{\text{ш}}} = \frac{k_{\text{ш}}}{l} \quad (1)$$

где $k_{\text{ш}}$ абсолютная шероховатость в мм.

Ориентировочные значения абсолютной шероховатости поверхностей лопаток приведены на рисунке 13.

Профильные и суммарные потери в решетках возрастают с увеличением относительно шероховатости [38].

Способ обработки поверхности лопатки (способ получения)	Лопатки грубого литья	Шлифованные лопатки, поврежденные коррозией	Точное литье	Строгание
Средняя высота неровностей $k_{ш}$	$100 \pm 250 \cdot 10^{-3}$	$(10 \pm 30) \cdot 10^{-3}$	$(20 \pm 30) \cdot 10^{-3}$	$(20 \pm 40) \cdot 10^{-3}$
Обозначение класса чистоты поверхности	$\nabla 1$	—	$\nabla 4 \pm \nabla 5$	$\nabla 4 \pm \nabla 5$
Способ обработки поверхности лопатки (способ получения)	Точение	Фрезерование по копиру (отделочное)	Шлифование	Отделка протягиванием
Средняя высота неровностей $k_{ш}$	$(10 \pm 20) \cdot 10^{-3}$	$(10 \pm 32) \cdot 10^{-3}$	$(10 \pm 6,3) \cdot 10^{-3}$	$(6,3 - 3,2) \cdot 10^{-3}$
Обозначение класса чистоты поверхности	$\nabla 5 \pm \nabla 6$	$\nabla 6 \pm \nabla 8$	$\nabla 6 \pm \nabla 7$	$\nabla 7 \pm \nabla 8$

Рисунок 13. Чистота поверхности лопаток.

В зависимости от шероховатости лопаток может меняться характер течения. При малых скоростях бугорки шероховатости погружены в ламинарный подслой и поверхность лопатки можно считать гладкой.

Когда бугорки шероховатости выходят за пределы ламинарного подслоя, наступает резкое увеличение коэффициента потерь, который при дальнейшем увеличении скорости не зависит от числа Re . Наступает режим автомодельное по числу Re . Сопротивление трения для этих режимов зависит от величины относительной шероховатости. Если бугорки шероховатости имеют почти такой же размер, что и толщина ламинарного подслоя, то имеют место переходные режимы.

Имеющиеся опытные данные недостаточны для разработки надежного метода расчета с учетом шероховатости.

Изменение толщины выходной кромки профиля решетки приводит к изменению величины потерь и, в частности, кромочных.

Обобщение многочисленных опытных данных показывает, что коэффициент кромочных потерь зависит от относительного шага t и толщины выходной кромки и может быть определен по формуле

При изменении шага меняются распределение скоростей по профилю и соответственно структура пограничных слоев, потери на трение, а также кромочные потери.

Анализ сведений о параметрах поверхностного слоя после различных видов обработки и данные о пределах выносливости лопаток компрессоров из титановых сплавов ВТ3-1 и ВТ8 [37,38], позволяет заключить, что при одинаковой шероховатости поверхности вклад остаточных напряжений сжатия в повышение предела выносливости оказывается выше, чем вклад шероховатости: напряжения сжатия более 400 МПа могут, как и на стальных лопатках, компенсировать снижение шероховатости поверхности на 1-2 класса.

Исследования остаточных напряжений в лопатках, подвергавшихся механической обработке [12,36,37], виброгалтовке и стабилизирующему отпуску, показали, что после окончательной механической обработки в поверхностном слое образуются сжимающие остаточные напряжения 200-300 МПа с глубиной залегания 60-70 мкм. После виброгалтовки сжимающие напряжения достигают 400-500 МПа при глубине залегания 100-150 мкм. Стабилизирующий отпуск практически устраняет остаточные напряжения, а последующая глянецовка способствует образованию умеренных (до 300 МПа) сжимающих напряжений с глубиной залегания 10-20 мкм и росту предела выносливости почти на 70 % [8].

Сопротивление усталости [39] лопаток из деформируемых сплавов после алитирования снижается на 5-35 % (в зависимости от рабочей температуры и размера лопатки), что объясняется низкой пластичностью алюминидов никеля. Такое покрытие толщиной 30 мкм растрескивается при деформации, равной 0.3 %.

С повышением температуры пластичность алюминидов увеличивается. Покрyтия системы Никель-Хром в тех же условиях выдерживают деформации 0.5-0.7 % [8].

С увеличением размеров лопаток влияние алитирования на усталость уменьшается, что, в первую очередь, связано с уменьшением относительной толщины алитированного слоя на кромках.

Для лопаток компрессоров, получаемых из поковок, предел выносливости зависит в первую очередь не от геометрических параметров, а от технологии изготовления и, в частности, способа получения заготовки, формирующего структурное состояние титановых сплавов и сталей [7,11,40].

На практике, как правило, отсутствуют статические разрушения замковых соединений рабочих лопаток компрессора и турбины при условии, если в процессе изготовления деталей не допущены грубые технологические отклонения, сопровождающиеся резким снижением механических свойств материала. Но оптимально спроектированные по статической прочности диски и замковые соединения могут не обладать необходимой несущей способностью при переменных напряжениях даже при запасе по статической прочности более трех.

При работе рабочие лопатки подвергаются воздействию силового поля, создаваемого центробежными силами, а при взаимодействии с воздушным потоком - вынужденным или резонансным колебаниям различной интенсивности, которые в конечном счете воспринимаются замковым соединением.

На тяжелых режимах работы в зонах концентрации напряжений замковых соединений, особенно первых ступеней, могут возникнуть пластические деформации.

Рабочие лопатки компрессоров чаще всего соединяются с дисками при помощи замков типа "ласточкин хвост", обеспечивающих простую и надежную сборку.

Лопатки последней ступени компрессора низкого давления могут иметь шарнирный замок, а крупногабаритные лопатки первых ступеней компрессора низкого давления - двузубый или трехзубый елочный замок.

Исследования причин снижения сопротивления усталости замковых соединений типа "ласточкин хвост" показали, что при действии переменных и циклических нагрузок усталостное разрушение вызывается фреттинг-коррозией, развивающейся на контактных гранях хвостовиков и дисков [12,39].

Сопротивление усталости малоразмерных хвостовиков выше. Это объясняется более низкими значениями концентрации напряжений, которые удается реализовать в малоразмерных хвостовиках и влиянием масштабного фактора, что наиболее характерно для лопаток их деформируемых сплавов.

Одним из способов повышения сопротивления усталости компрессорных лопаток является поверхностное упрочнение. Из упрочняющих обработок наибольшее распространение получила виброгалтовка, которая применяется одновременно с виброшлифованием. Виброгалтовка рекомендуется для малоразмерных лопаток и лопаток с острыми кромками, так как другие способы упрочнения оказываются для них грубыми, повреждающими кромки. Шероховатость поверхности детали после виброгалтовки изменяется с 0.6 до 0.16 мкм. К недостаткам операции следует отнести малую степень наклепа поверхностного слоя и значительную длительность процесса, достигающую 30 мин и более [7]. 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 удастся, 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 стеклянных микрошариков [7,12].

Уменьшения отрицательного влияния механической обработки на сопротивление усталости можно добиться применением электрохимического фрезерования вместо механического, введением в технологический процесс виброшлифования и поверхностно упрочняющих обработок, а также применением

стабилизирующей термической обработки окончательно изготовленных лопаток. Вальцевание с использованием предварительно, шлифованных заготовок, высокоскоростная штамповка с виброшлифованием могут существенно повысить предел выносливости.

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.

При повышенных температурах (250-500°C) в среде, содержащей ионы хлора, при действии статических нагрузок наблюдается поверхностное растрескивание титановых сплавов, приводящее к снижению длительной прочности и пластичности материала. В поверхности изломов возникают характерные признаки хрупкого разрушения материала с типичным рисунком скола. На хрупком изломе видны признаки растрескивания.

Сильное влияние на пластические свойства оказывают скорость нагружения, температура и величина статической составляющей. Наибольшее охрупчивание возникает при наличии концентрации напряжений, понижении температуры испытания и снижении скорости нагружения. Одной из причин охрупчивания титановых сплавов в солевой среде является наводороживание. Наибольшая концентрация водорода в 4-6 раз больше нормы наблюдается в местах концентрации напряжений (надрезах, галтелях и др.). Исследования, проведенные на сплаве системы Титан-Алюминий-Ванадий в условиях солевой коррозии, показали, что чувствительность к солевой коррозии увеличивается при содержании алюминия в сплаве сверх 4%.

Исследования, выполненные на сплавах ВТ6, ВТ3-1 и ВТ8, показали, что солевая коррозия способствует снижению усталости и долговечности [11,12,39]

уменьшая время до появления макротрещин и увеличивая скорость распространения трещин.

Испытания лопаток из стали 14X17H2 после эксплуатации их в агрессивной коррозионной среде показали, что предел выносливости снижается в 1.7-2.35 раза.

Наибольшей сопротивляемостью коррозионным повреждениям из сталей мартенситного класса обладает стали, подвергнутые высокотемпературному отпуску и имеющие защитное покрытие Никель-Кадмий.

Для защиты от коррозии используются гальванические покрытия из никеля, хрома, кадмия, титана, цинка, меди, а также алитирование и др. Эффективность покрытий прямо пропорциональна толщине их слоя. В агрессивной среде для стальных деталей необходимо покрытие толщиной не менее 25-50 мкм, а в обычных атмосферных условиях толщина покрытия может быть уменьшена до 13-15 мкм. В приморских районах не рекомендуется применение фосфатирования и оксидирования как нестойких покрытий. Нецелесообразно также применение пористых покрытий.

Сопротивляемость коррозии коррозионно-стойких сталей мартенситного класса с учетом технологической наследственности можно повысить за счет повышения температурного отпуска.

На частях лопаток, поверхность которых при работе наиболее подвергается эрозии (входные кромки и корыто лопаток), покрытия быстро разрушаются, а недостаточная адгезия покрытий приводит к развитию под ними точечной коррозии. Для повышения предела выносливости лопаток ГТД, подверженных коррозионному повреждению, применяется поверхностное упрочнение профиля лопаток гидродробеструйной обработкой, гидрогалтовкой, виброгалтовкой или ультразвуком [7].

Для защиты лопаток от коррозии применяют покрытия типа ЭП586 на основе эпоксидных смол, гальванические покрытия типа Никель-Кадмий и др. Но эти покрытия плохо сопротивляются эрозии, а поверхности с нарушенным покрытием корродируют. Недостатком неметаллических покрытий является их значительная толщина (около 100 мкм) и невысокая температура применения (до

300°С). Общим недостатком металлических покрытий, наносимых обычно гальваническим способом, является некоторое снижение предела выносливости детали.

В настоящее время разработаны технологические операции, применение которых уменьшает отрицательное влияние покрытий. К ним относится термодиффузионный отжиг деталей с Никель-Кадмиевым покрытием, который не снижает предел выносливости лопаток из коррозионностойких сталей при нормальной температуре и способствует его сохранению даже после эксплуатации изделий и при наличии на лопатках эрозионных повреждений. Применение покрытия Никель-Кадмий с термодиффузионным отжигом не снижает предел выносливости при наличии забоин.

В последнее время для повышения коррозионно-эрозионной стойкости стальных лопаток компрессора, изготовленных из сталей типа 13X11H2B22MMФ-Ш, 14X12H2M2ФАБ-Ш, применяется низкотемпературное алитирование силикатно-фосфатной пленкой. Для предотвращения коррозионных повреждений при эксплуатации в условиях морского климата эффективны мероприятия: промывка пресной водой; консервация специальной эмульсией АКОР; при длительных стоянках делаются периодические запуски с последующей консервацией двигателя.

Для деталей ГТД, эксплуатирующийся при температурах, не превышающих температуру старения материала, наиболее эффективными являются поверхностные упрочняющие обработки в сочетании с антифрикционными покрытиями.

Для повышения износостойкости антивибрационных полок лопаток применяют детонационное напыление площадок контакта. Однако повышая износостойкость, процесс напыления почти в два раза снижает предел выносливости, что соизмеримо с повреждением материала фреттинг-коррозией.

Можно выделить частные и интегральные показатели качества. Приведем частные технологические показатели качества лопатки – таблица 3.

Таблица 3. Частные показатели качества.

Механические свойства поверхности	Микрорельеф поверхность	Геометрия поверхности	Другие показатели
	шероховатость	отклонения формы теоретического сечения	отклонения частоты собственных колебаний лопаток
распределение остаточных напряжений	направление неровностей поверхности	отклонения угла установки профиля	
твердость	поверхностные дефекты	отклонения формы и размеров хвостовиков и замков	
		отклонения формы и размеров хвостовиков и замков	

Частные показатели качества подлежат полному или выборочному контролю на различных этапах изготовления детали. При выполнении требований по частным показателям должно выполняться условие соответствия интегральных показателей качества требованиям к эксплуатационным требованиям к лопатке. Для лопатки КВД ГТД можно выделить три интегральных показателей качества.

Износостойкость – определяет сопротивление контактных поверхностей замков и полок фреттинг-износу, появлению задиров и выкашиванию.

Коррозионная стойкость – определяет сопротивление контактных поверхностей замков и полок фреттинг-коррозии, сопротивление поверхностей пера лопатки коррозии, связанной с взаимодействием с агрессивной средой, что особо важно для последних ступеней КВД.

Усталостная прочность – определяет ресурс лопатки при действии неравномерных полей давлений, колебаний и различных видов нагружения при эксплуатации изделия.

Износостойкость и коррозионная стойкость обеспечивается в основном за счет свойств поверхностного слоя и применения различных защитных покрытий. Для обеспечения требований по усталостной прочности необходимо выполнение требований по всем частным показателям качества изделия.

Механические свойства поверхности обеспечиваются за счет технологических приемов.

Глубина и степень наклепа обеспечивается либо в процессе снятия припуска, например, при механообработке, либо применением специальных упрочняющих операций, например, дробеструйной обработкой или виброгалтовкой.

Распределение остаточных напряжений во многом зависит от методов получения заготовок и операции завершающей сьем припуска. Для лопаток КВД благоприятным распределением считается [42,43] наличие сжимающих напряжений на глубину в 10-20 мкм в размере 200-400 МПа.

Микрорельеф поверхности обеспечивается за счет метода окончательного формообразования, специальных методов финишной или отделочной обработки (виброгалтовка, полирование и др.)

Геометрия детали обеспечивается за счет стабильности технологического процесса и жесткого контроля геометрии на всех этапах производства.

Стабильность частоты собственных колебаний лопаток обеспечивается отклонением геометрии деталей, а также стабильностью внутренней структуры заготовок.

2.3 Экономические показатели качества лопатки КВД

Экономические показатели качества изделия зависят прежде всего от технологии его изготовления, объемов, такта выпуска, а также других факторов. Определение экономических показателей качества является отдельной задачей. Но при разработке технологии изготовления лопатки технологам необходимо проводить работы по нормированию операций, что в свою очередь в дальнейшем необходимо службам предприятия для планирования производства и расчета цены изделия. Для этих целей на предприятиях разрабатываются стандарты по расчету и нормированию различных технологических операций с учетом специфики предприятия. Так же существуют общие методики по нормированию операций и расчету режимов обработки.

Следует отметить? что методики нормирования поддаются автоматизации, например, [44-46].

Техпроцесс изготовления лопаток компрессора формируется из трех основных частей. Первая часть — это обработка полок, хвостовиков, замков, вторая часть связана с формообразованием пера. К третьей части техпроцесса можно отнести операции формирования поверхностного слоя детали, а также нанесение покрытий. Для формирования хвостовиков и замков лопаток используются такие операции, как фрезерование, протяжка, токарная обработка; существуют лопатки, у которых соединение пера и полка производится сваркой. Для окончательного формообразования пера используются четыре основных операции: вальцевание, электрохимическая обработка, шлифование и фрезерование. Заготовки при производстве лопаток компрессоров используются в большинстве своем штампованные. Кроме того, развитие технологий изготовления деталей из композиционных материалов позволяет предположить расширение области применения композитных лопаток.

Очевидно, что все операции, используемые при производстве лопаток компрессоров, имеют свои достоинства и недостатки, а также свои области применения. Например, для лопаток статора с двумя хвостовиками применение вальцевания пера не представляется возможным.

Принято считать [41], что вальцевание – наиболее эффективный метод обработки лопаток при крупносерийном производстве. Но в настоящее время серийность выпуска, объем выпуска лопаток осевых компрессоров значительно ниже, чем был 20-30 лет назад, кроме того такт выпуска деталей достаточно неравномерен по времени. Это требует при освоении производства новых изделий более точного прогноза затрат на освоение их производства. Что в свою очередь ставит задачу формирования технологии производства лопаток на ранних стадиях их проектирования с оценкой целесообразности выбора той или иной технологии, определения границ эффективности технологии в зависимости от различных параметров, таких как: конструкция лопатки, материал, серийность выпуска, необходимый ресурс и др.

При планировании затрат на производство детали, на основе данных маршрутной и операционной технологии оценивают время, затрачиваемое на ее производство и стоимость процесса. Даже если рассматривать конкретную лопатку, достоверно оценить эти параметры проблематично, и эти данные являются собственностью предприятия изготовителя, поэтому часто при расчетах используются усредненные значения. Но в тоже время, опираясь на косвенные данные и открытую литературу, возможно провести сравнительную оценку различных вариантов изготовления конкретной лопатки.

Рассмотрим применяемые технологии изготовления типовой лопатки компрессора:

- материал ВТ-8М,
- высота лопатки 80 мм,
- хорда 30 мм,
- один замок типа ласточкин хвост, без полок.

Будем рассматривать три технологические цепочки, которые условно разделим по типу основной операции формообразования пера лопатки:

- вальцевание:
 - заготовительные операции – высадка (электровысадка), штамповка (2-3 перехода). Оборудование кривошипные и электро-винтовые прессы, спец. штамповая оснастка;
 - обработка замка – протяжка. Спец. режущий инструмент, вертикальный или горизонтальный протяжной станок;
 - обработка пера – вальцевание (1-3 переходов), с разбитием лопаток на группы. Спец. вальцовочная оснастка;
 - окончательная обработка – полировка пера, ручная полировка радиусов перехода пера к замку;
 - контроль – сквозной контроль внутренней структуры, выборочный контроль геометрии на ПОМКЛ;
 - остальное – слесарные, транспортные, складирование и др.
- электрохимическая обработка:

- заготовительные операции – также, как и при вальцовке, но с меньшим количеством переходов;
 - обработка замка – также, как и при вальцовке;
 - обработка пера – электрохимическая двухсторонняя обработка пера. Спец. инструмент – электроды с высоким ресурсом, спец. оборудование;
 - окончательная обработка – полировка пера. Ручная полировка радиусов перехода пера к замку;
 - контроль – сквозной контроль внутренней структуры, выборочный контроль геометрии на ПОМКЛ;
 - остальное – слесарные, транспортные, складирование и др.
- фрезерование;
 - заготовительные операции – штамповка прутка. Оборудование кривошипный пресс, спец. оснастка не требуется;
 - обработка замка – фрезерование базовых поверхностей замка лопатки. Универсальное горизонтально фрезерное оборудование. Типовая спец. оснастка;
 - обработка пера – фрезерование пера лопатки. 4-х или 5-и координатный станок с ЧПУ. Типовая спец. оснастка.
 - окончательная обработка – полировка пера. Ручная полировка;
 - контроль – контроль пера лопатки. Автоматизированная КИМ. Типовая спец. оснастка.
 - остальное – слесарные, транспортные, складирование и др.

Вальцевание будем считать базовой технологией. Расчеты будем приводить для комплекта примерно из 70 деталей.

Будем рассматривать три показателя характеризующих технологический процесс:

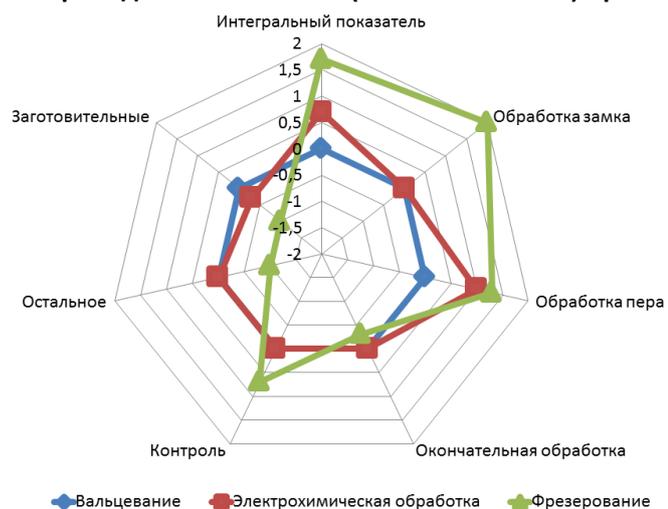
- приведенное основное (технологическое) время – время, затрачиваемое на выполнение самой операции;

- приведенное вспомогательное время – время, затрачиваемое на вспомогательные операции, без которых не возможно реализовать основные формообразующие операции;
- приведенная стоимость – стоимость операции с учетом расходов на инструмент, оснастку, оплату труда и др.

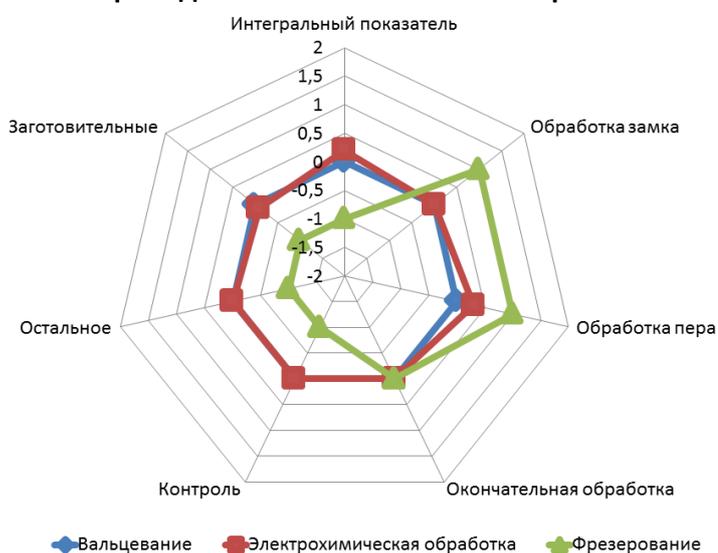
Показатели отдельных этапов техпроцесса будем рассчитывать отдельно для каждой группы операций по отношению к вальцеванию, то есть $P_{Ti} = P_{ei} / P_{Ti}$, где P_{Ti} – значение данного показателя для выбранной технологии, T – рассматриваемая технология (вальцевание, электрохимическая обработка, фрезерование), 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 14), где по осям отложены десятичные логарифмы значений P_{Ti} .

Если анализировать рисунок 14, 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 14 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. Технология с вальцеванием пера лопатки, несмотря на сложность в освоении имеет существенное преимущество по сравнению с другими техпроцессами – в результате упрочняющего воздействия на поверхностный слой детали, в нем создается благоприятная картина напряжений, что способствует увеличению ресурса детали. При других методах обработки добиться этого не всегда возможно даже применяя специальные упрочняющие операции.

Приведенное основное (технологическое) время



Приведенное вспомогательное время



Приведённая стоимость

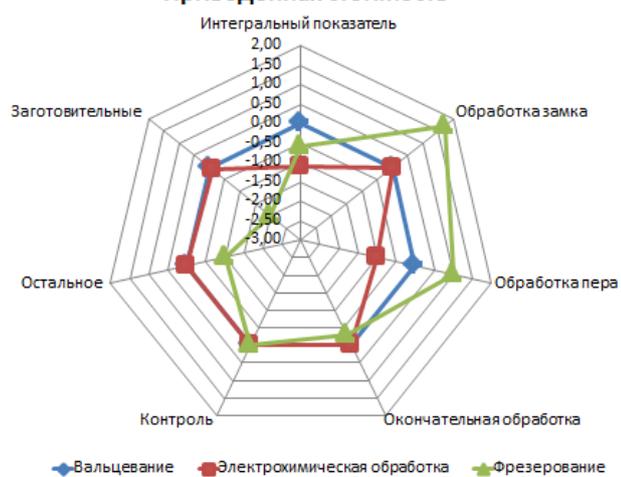


Рисунок 14. Диаграммы распределения показателей, характеризующих техпроцесс изготовления лопатки компрессора ГТД.

Перспективной технологией может быть технология электрохимической обработки пера лопатки от заготовки-бруска или заготовки с большим припуском. Если судить по рисунку 14 это по всем показателям делает ее выгодней других технологий, но здесь есть ограничения технического характера, связанные со структурой поверхностного слоя детали, геометрической точностью, отсутствием оборудования (в связи с ограничениями самой технологии) для обработки заготовок большого размера.

Для каждого предприятия картина распределения показателей техпроцесса изготовления детали может быть различна. Поэтому для того что бы 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.

Выше мы показали, что при выборе технологии изготовления лопатки компрессора необходимо обрабатывать большое количество информации, которая представляется в различных видах и формах. Для того что бы этой информацией возможно было оперировать при проектировании технологического процесса необходимо провести ее классификацию и представить в стандартизованном виде.

2.4 Порядок разработки технологии производства лопатки КВД

На первом этапе разработки технологии производства лопатки КВД необходимо провести формирование маршрутной технологии. Как правило, проектирование проводится на основе существующих технологий для аналогичных по конструкции лопаток КВД.

2.4.1 Разработка классификатора конструкций

При типизации техпроцессов будем использовать следующие параметры (на основе раздела 1).

Таблица 4. 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 основе предложенного классификатора одна из самых распространенных лопаток в современных двигателях (дозвуковая, высота 110, хорда 70, без полок, замок – ласточкин хвост) будет иметь обозначение – Д-012-800-00-00-01.

После определение базовой технологии можно проводить на основе нее формирование технологии для нового изделия.

2.4.2 Порядок разработки 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 (Рисунок 15).

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, формируется представление о том какие дополнительные мероприятия необходимо провести для их обеспечения в связи с особенностями фрезерной обработки, вальцевания, шлифования или ЭХО.

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

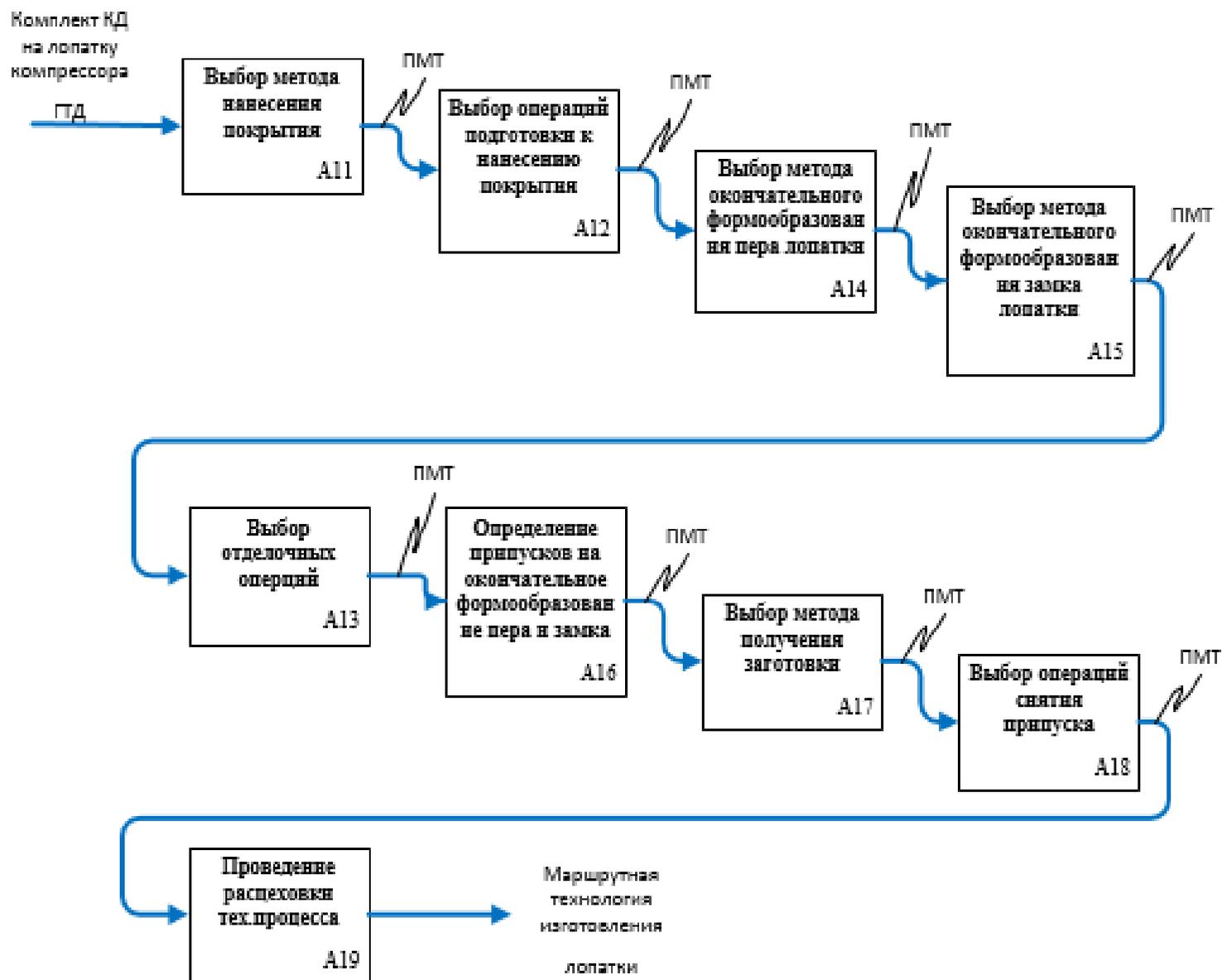


Рисунок 15. Процесс разработки маршрутной технологии.

Разработка по операционного описания технологического процесса на предприятиях двигателестроения, как правило, производится в цехах предприятия. Здесь на основе существующих операций, наличных СТО проводится анализ предлагаемой маршрутной технологии на предмет ее осуществимости. При принятии положительного решения проводятся работы по закреплению оборудования за операциями. Так же определяется потребность в закупке или проектировании инструмента и оснастки. На основании расчетов режимов обработки проводится предварительное нормирование операций. Потребность цеха в СТО передается в службы планирования предприятия. Сроки и объемы необходимых СТО являются одним из экономических ограничений, накладываемых на технологию изготовления лопатки КВД.

2.4.3 Учет технологической наследственности при разработке маршрутной технологии

При описании последовательности разработки маршрутной технологии необходимо остановиться на следующем не маловажном моменте, который во многом определяет последовательность технологических операций – технологическая наследственность.

При разработке техпроцесса изготовления лопатки КВД существуют такие операции, применение которых влечет за собой необходимость применения дополнительных мероприятий либо по контролю, либо по устранению негативных последствий применения данных операций [6,7,50-52]– таблица 5.

Таблица 5. Технологическая наследственность.

Операция	Вид негативного эффекта	Способ устранения
Штамповка, горячая 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

2.4.4 Сравнительный анализ методов формообразования пера лопатки

Анализ влияния методов формообразования пера лопатки на технологические показатели качества и показатели надежности позволяет определить преимущества и недостатки существующих методов.

Вальцевание. Самый производительный метод получения пера лопатки, при серийном производстве наиболее выгоден. Не требует наличия высокотехнологичного специализированного оборудования. Требуется больших затрат на разработку штамповой оснастки, технология на основе вальцевания сложна в освоении и требует больших сроков на доводку. Требуется наличие термической обработки. Требуется большое количество промежуточных контролей различных параметров заготовок и детали. Практически не поддается автоматизации получение скруглений перехода пера к замку, что требует непроизводительного ручного труда. Имеется узкая область применения метода только для лопатках с одним замком, малой закруткой, практически не применим для лопаток двигателей пятого поколения.

Характеристики поверхностного слоя, шероховатости, физико-химическое состояние материала детали позволяют получать высокие значения усталостной прочности детали без применения дополнительной упрочняющей обработки.

Электрохимическая обработка. По производительности лишь незначительно уступает вальцеванию. Требуется наличия узкоспециализированного оборудования. При обработке используются электролиты на основе кислот, что вредно с точки зрения экологии и безопасности труда. Имеются ограничения по площади обработки и как следствие, размерам обрабатываемой детали. После обработки образуется слой, насыщенный водородом, что требует дополнительных мероприятий по его удалению. Требуется как штамповая оснастка, так и инструменты-электроды для обработки. Возможны прожоги на кромках лопаток.

После обработки необходимо применять дополнительное упрочнение детали для формирования благоприятного распределения остаточных напряжений. Невысокая усталостная прочность лопаток, изготовленных с применением ЭХО ограничивает область применения метода.

Фрезерование. Не производительный метод обработки. Требуется наличия большого количества механообрабатывающих станков. Дорогой покупной инструмент. Требуется малопроизводительной ручной полировки, что приводит к браку и прижогам. Имеются сложности при обработке тонких высоких лопаток, связанных с колебаниями во время обработки. Самый адаптивный метод обработки, не требует сложной специальной оснастки. Высокая стабильность процесса и показателей качества изделия.

Относительно высокие показатели усталостной прочности (незначительно ниже вальцевания), требуется дополнительное поверхностное упрочнение.

2.4.5 Выбор технологии изготовления

Выбор технически обоснованной технологии изготовления лопатки КВД основывается на процедуре сравнения двух и более технологий между собой по целевым критериям качества. Целью выбора технологии является минимизация конечной стоимости изделия и сокращения сроков освоения его производства.

Алгоритм разработки маршрутной технологии изготовления лопатки с учетом разработанной методики представлен на рисунке 16. В процессе работы по данному алгоритму технологам необходимо работать с различными информационными базами данных для оценки показателей качества, оборудования, СТО.

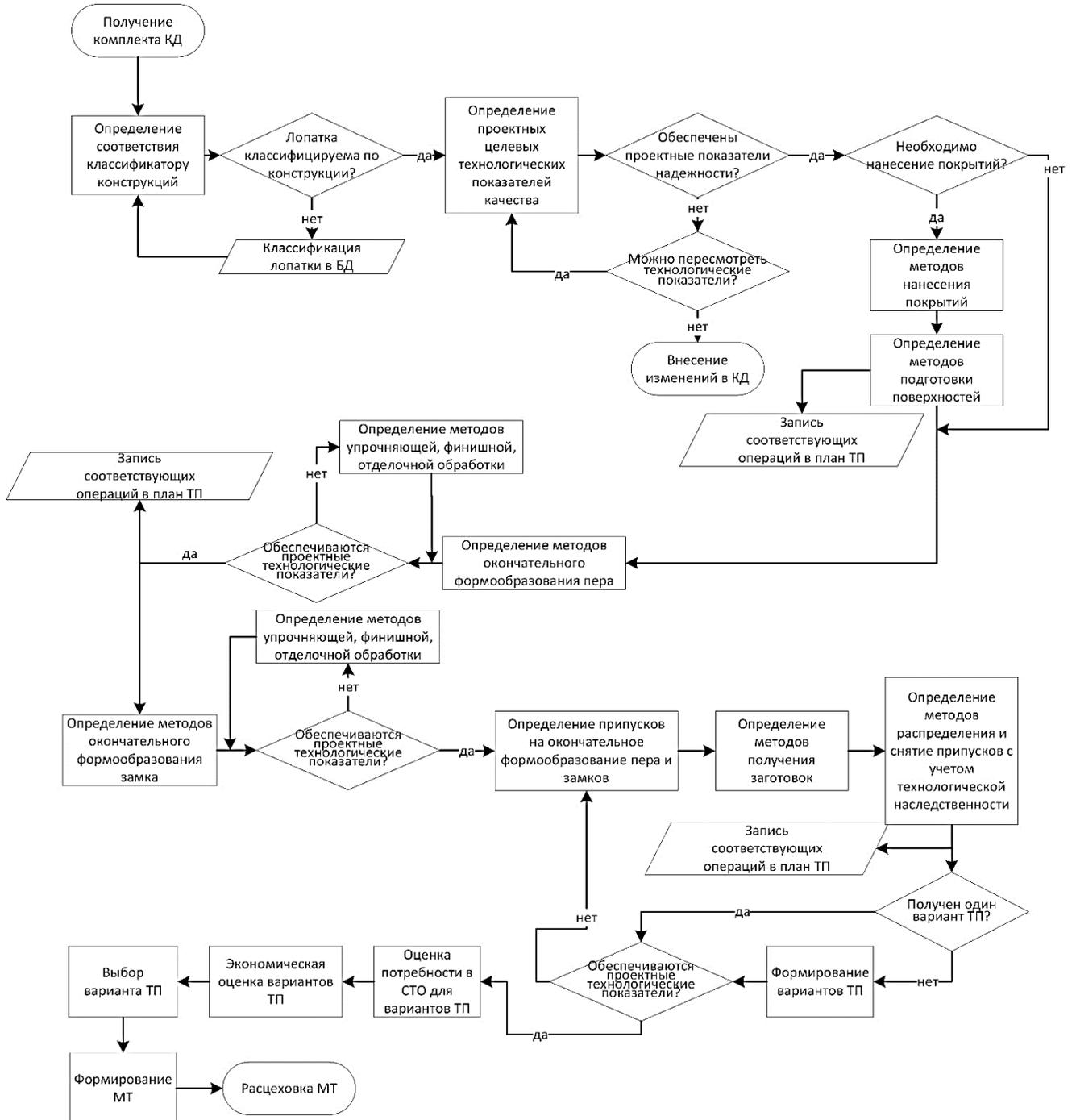


Рисунок 16. Алгоритм проектирования технологического процесса изготовления лопатки.

К сравнению принимаются проекты технологий, которые при технически обоснованном выборе обеспечивают показатели надежности и показатели качества лопатки КВД. Окончательный выбор проводится по экономическим показателям качества. Пример реализации методики на конкретной лопатке показан на рисунке 17.



Рисунок 17. Пример применения методики выбора технически обоснованной технологии изготовления лопатки.

В качестве интегрального показателя экономического качества лопатки может применяться показатель трудоемкости так как он не требует знаний о ценовых параметрах процессов, формирующих бизнес-процесс производства изделия.

Но необходимо отметить что такой подход не дает полной картины о конечных затратах на освоение производства и производства продукции. Такие оценки возможно провести только имея сопоставление большого количества технической информации с информацией экономического характера связанной с логистикой, доступностью материальных ресурсов, сопутствующих затрат и много другого. Таким образом при формировании технически обоснованной технологии производства лопатки КВД необходимо понимать, что все данные необходимые или формируемые на этапе ТПП неразрывно связаны с экономической информацией. Именно для устранения подобных информационных разрывов

необходимо применений CALS-технологии на всех этапах жизненного цикла изделия.

Выводы по главе.

На основании проведенного исследования технологий изготовления лопаток КВД и технологической подготовки их производства разработана методика выбора технически обоснованной технологии производства лопатки КВД на основе:

- конструктивных особенностей лопаток КВД;
- требуемых технологических показателей качества лопатки КВД;
- экономических показателей качества лопатки КВД;
- технологическая наследственность операций обработки лопаток КВД.

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

Глава 3. Методика организации процессов ТПП лопаток компрессоров ГТД на основе CALS-технологий

Основой для построения любой системы на принципах CALS-технологий является неразрывность данных ((данный подход рассмотрен в [53-58]).

Необходимо отметить, что в отличии от существующих на предприятиях бизнес-процессов организации работ при разработке технологического процесса, предлагаемая методика позволяет внедрять так называемое проектное управление. Сейчас работа всех служб осуществляется последовательно, например, пока отдел главного конструктора не подготовит 3D-модель детали отдел главного технолога не начнет разработку технологии, пока отдел главного технолога завершит разработку технологии не будет начата разработка СТО и т.д. Используя в работе единую БД и разработку на основе CALS-технологий большая часть данных взаимосвязана, отпадает необходимость постоянной печати и утверждения бумажных документов и др., все это позволяет осуществлять многие этапы разработки параллельно с постепенным накоплением необходимых данных.

На основе анализа данных используемых при проектировании технологических процессов изготовления лопаток можно составить структуру данных базы, данных описывающих конструкцию и технологический процесс. Для описания необходимо выделить основные структуры данных используемые на этапе ТПП.

3.1 Структура базы данных

На этапе ТПП входными данными является конструкторское описание изделия – лопатки. Так же при проектировании СТО на этапе ТПП применяется конструкторской описание, например, технологической оснастки и инструмента.

Конструкция изделия

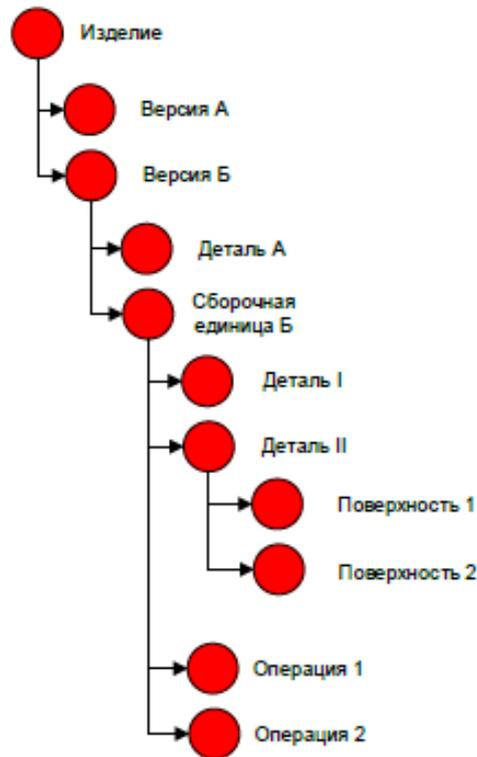


Рисунок 18. Конструкторское представление.

Конструкция описывается сборочными единицами и деталями через входимость компонентов. Каждая деталь и сборочная единица в свою очередь описывается простейшими элементами геометрии – поверхностями.

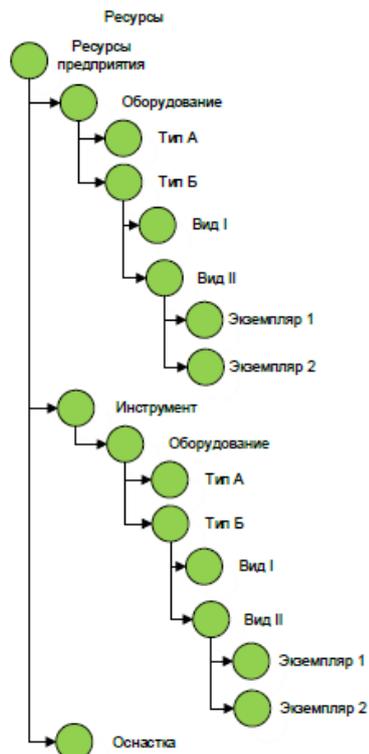


Рисунок 19 Ресурсы.

Помещения

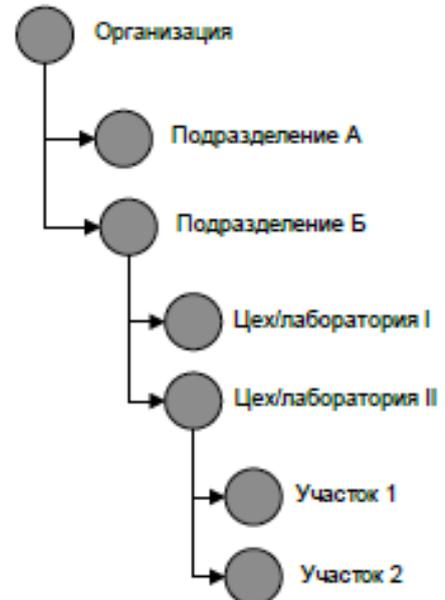


Рисунок 20. Помещения.

Для описания технологического процесса изготовления лопатки КВД необходимо иметь описание на все данные описывающие СТО [59]. В общем случаи 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) 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.

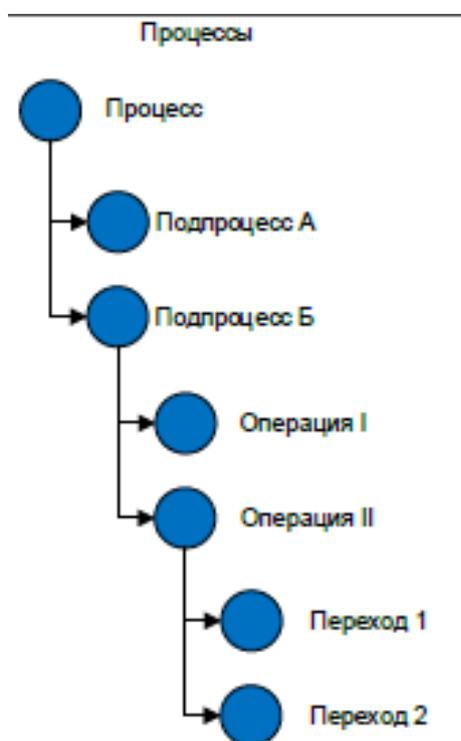


Рисунок 21 Процессы производства.

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.

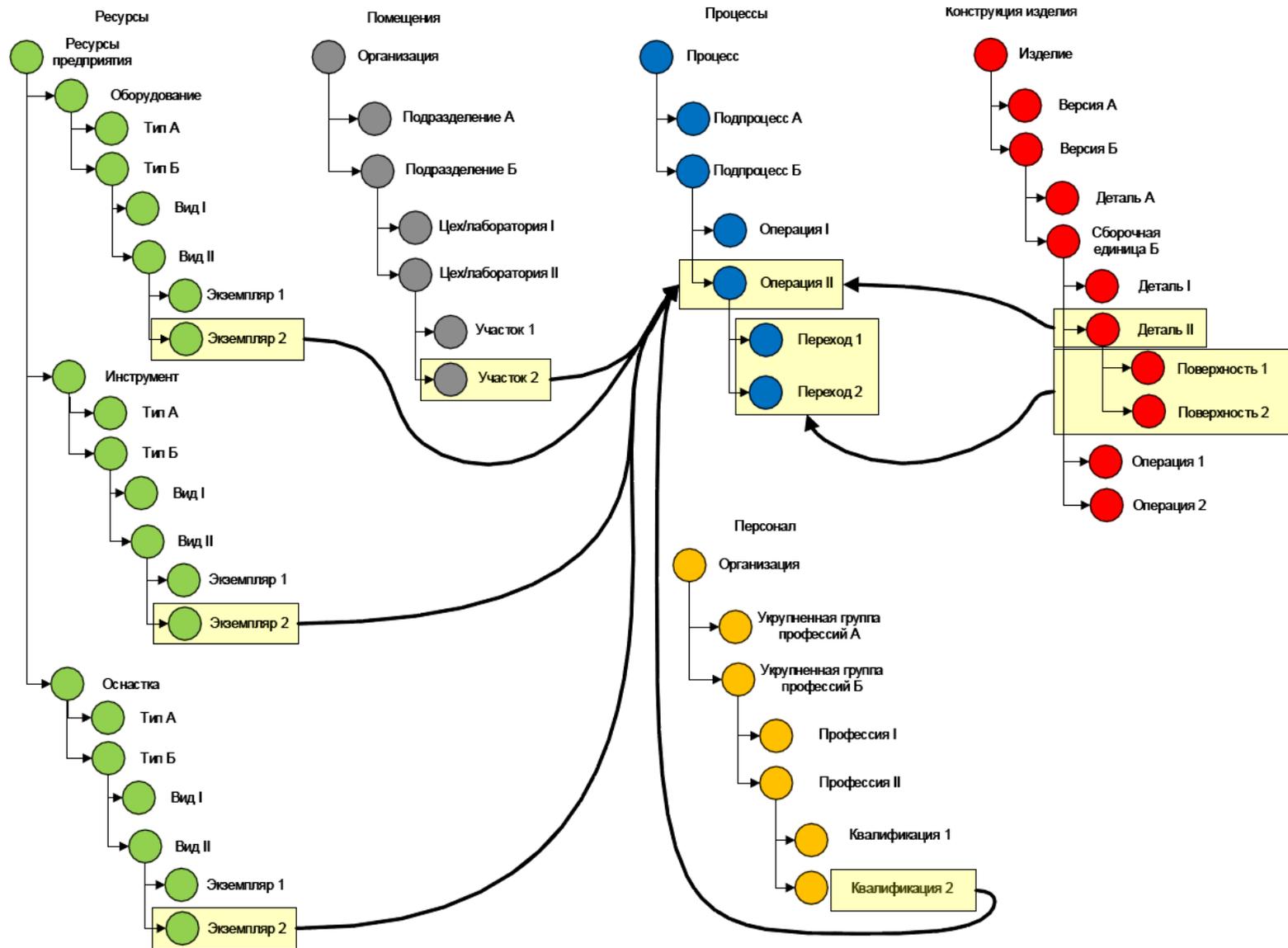


Рисунок 22 Связи объектов БД.

Комплектность документации на изготовление оговаривается стандартами [60-62]. Согласно им можно составить укрупненный перечень технологической документации формируемый на этапе ТПП (таблица 6).

Таблица 6. Комплектность документов.

№	Наименование документа
1.	Комплект конструкторской документации на лопатку.
2.	Маршрутное описание технологического процесса (маршрутная карта)
3.	Операционное описание технологического процесса (комплект операционных карт)
4.	Материальная ведомость необходимых для изготовления: оборудования, заготовок, вспомогательных материалов, инструмента, оснастки.
5.	Комплекты конструкторской документации на специальное оборудование, инструмент, оснастку.
6.	Маршрутное описание технологического процесса (маршрутная карта) на специальное оборудование, инструмент, оснастку.
7.	Операционное описание технологического процесса (комплект операционных карт) на специальное оборудование, инструмент, оснастку.
8.	Документы, устанавливающие методики расчета норм трудоемкости для технологических операций.

Рассмотрим какие данные используются для описания операции при формировании технологического процесса. Рассмотрим на примере фрезерования на станке с ЧПУ.

В первую очередь необходимо иметь маршрутное описание маршрутного процесса в виде объектов базы, данных связанных связями родитель-потомок (иерархическая структура). Кроме того, необходимо иметь возможность размещать в базе данных печатные формы, выполненные в соответствии с ЕСТД. Так как техпроцесс может претерпевать изменения с течением времени либо при его

разработке могут требоваться его промежуточные варианты необходимо иметь возможность хранить и редактировать версии техпроцесса. Актуальной версией может быть только одна.

Держателями информации по конкретным операциям является цех. В связи с этим в базе данных должна находиться вся информация необходимая цеху для выполнения операции. Кроме документов, предусмотренных ЕСТД такой информацией является:

- чертеж и 3D-модель заготовки;
- программа обработки в САМ-системе;
- программа обработки в станочных кодах.

Кроме того, как говорилось выше, с каждой операцией должна быть ассоциирована информация по ресурсам – цех, участок, станок, инструмент, квалификация персонала.

Для сокращения сроков наладки и снижения количества брака целесообразно при написании программы обработки использовать модели станка, инструмента и приспособлений. Современные САМ–системы позволяют проводить моделирование обработки с учетом предотвращения столкновений с приспособлениями и элементами станка

Так же в базе данных необходимо хранить различную служебную информацию. Например, такой информацией могут быть обозначения, наименования деталей или операций. Для этого необходимо иметь системные объекты, поддерживающие хранение различной информации в виде таблиц, текста, ссылочных свойств (например, материала). Такие объекты базы данных принято называть карточки. Очень часто в них хранятся данные необходимые с точки зрения, например, ЕСКД – кто выполнил, кто утвердил, подразделение, различные внутренние признаки. Иногда эта информация хранится в атрибутах объекта базы данных к которому она относится: детали, операции и т.д.

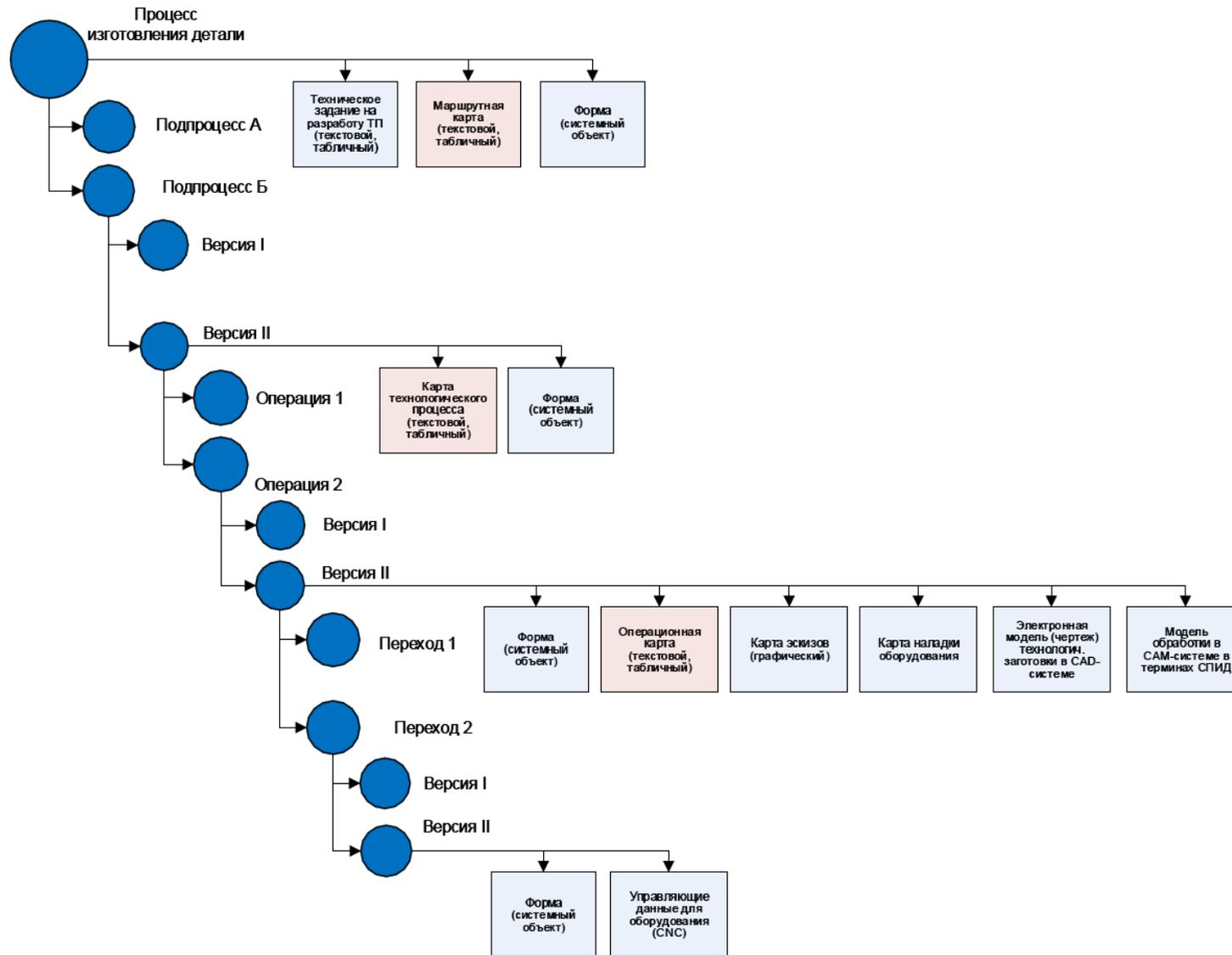


Рисунок 23 Связи технологических данных с объектами БД.

Различная информация, связанная проведением экспериментальных исследований может быть описана аналогичными способами. Порядок подготовки образцов описывается при помощи инструментов операционного описания, применяемого для техпроцессов. Аналогично проводится описание самого процесса исследования, с учетом необходимого оборудования, материалов, инструмента. Хранение данных полученных в результате исследования может осуществляться несколькими способами. Возможно создание в базе данных отдельных объектов для каждого исследования, главным условием тут будет уникальность хотя бы одного свойства (например, специального номера) и ассоциативная связь с объектом исследования, маршрутной технологией изготовления образца и проведения исследования. Это необходимо для того чтобы любой пользователь системы мог получить достоверную информацию по результатам исследования.

Как правило, результаты экспериментальных исследований подвергаются обработке для того чтобы привести их в стандартизованный и удобный для восприятия вид. Имеет смысл хранить в БД как «сырые» не обработанные данные в виде архива, так и данные уже в обработанном виде.

В некоторых случаях может быть целесообразно хранить экспериментальные данные в привязке к отдельному экземпляру изготовленной детали или технологии изготовления. Это можно решить за счет создания версий соответствующих деталей или техпроцессов в БД.

3.2 Управление доступом в БД

Одной из основных задач решаемых применением систем управления инженерными базами данных является контроль доступа. При разработке технологии изготовления детали в процессе участвует большое количество служб и сотрудников предприятия. На основании IDEF описания бизнес-процесса разработки технологии изготовления лопатки КВД можно составить матрицу ответственности сотрудников предприятия при работе в БД.

Таблица 7. Матрица доступа в БД.

Подразделение	Должность	Функции в БД
Отдел главного конструктора	Инженер	Создает и изменяет чертежи и 3D-модели на лопатку
	Начальник конструкторского бюро	Проверяет и утверждает комплект КД на лопатку
Отдел главного технолога	Инженер	Формирует проект маршрутной технологии в БД с учетом расцеховки
		Контролирует заполнение цехами операционного описания
		Готовит комплект технологической документации
		Готовит данные для расчетов трудоемкости и служб планирования производства
	Программист станков с ЧПУ	Готовит программы обработки деталей основного производства, проводит наладку в цехе изготовителя
	Начальник технологического бюро	Проверяет и утверждает сформированный техпроцесс и технологические документы
Цех основного производства	Инженер тех.бюро	Готовит в БД операционное описание техпроцесса
		Создает и изменяет чертежи и 3D-модели на заготовки
		Создает запросы на проектирование СТО

		Актуализирует классификатор СТО в БД
	Начальник технологического бюро	Проверяет и утверждает операционное описание тех процесса, чертежи и 3D-модели.
Конструкторский отдел СТО	Инженер	Создает и изменяет чертежи и 3D-модели на СТО
	Начальник конструкторского бюро	Проверяет и утверждает комплект КД
Цех вспомогательного производства	Инженер тех.бюро	Готовит в БД маршрутное и операционное описание техпроцесса
	Программист станков с ЧПУ	Готовит программы обработки деталей вспомогательного производства, проводит наладку в цехе изготовителе
	Начальник технологического бюро	Проверяет и утверждает операционное описание тех процесса, чертежи и 3D-модели.
Центральная измерительная лаборатория	Инженер	Готовит и проводит экспериментальное исследование образцов, размещая полученные данные в БД

Все сотрудник предприятия должны иметь доступ к объектам БД только в соответствии с оговоренным выше доступом.

3.3 Управление конструкторскими и технологическими данными

Для моделирования конструкций в БД целесообразно применять так называемый метод «мастер-модели». Принцип заключается в использовании для создания инженерной информации разных типов разных объектов БД, при этом

сохраняя ассоциативную связь между ними при помощи БД и САD-системы. Рассмотрим этот принцип на примере детали «Электрод для ЭХО».

Для инженерного описания детали «Крыльчатка» в электронном виде можно выделить несколько типов данных:

- 3d-модель с описанием последовательности действий, выполненных проектировщиком в системе САD, которые позволили ему получить конструкцию детали в электронном виде. Эту модель принято называть рабочей частью (РЧ) (рисунок 24);
- 3d-модель без дерева построения. Эта модель содержит мастер геометрию, которая используется для создания чертежей, в сборочных узлах, для САЕ-расчетов, при написании программ для станков с ЧПУ и др. В качестве мастер геометрии используется РЧ. Принято называть электронная модель изделия (ЭМ).
- Чертеж в электронном виде, выполненный в соответствии с ЕСКД, который принято называть электронный чертеж (ЭЧ). Создается путем добавления в файл ЭЧ файла ЭМ как компонента сборки;
- Файл сборочного узла в рамках которого можно управлять связями между геометрией зависимых деталей. В него добавляются все файлы деталей необходимые для создания инженерного описания детали (РЧ, ЭМ), в том числе другие детали, геометрия которых необходима для разработки конструкции данной детали (например, геометрия пера лопатки для привязки к нему геометрии электрода). Такая сборка называется управляющая структура (УС).

Описанные взаимосвязи можно представить в виде схемы – рисунок 26. Такой принцип построения моделей позволяет создавать взаимосвязи между деталями – при изменении размеров в мастер-геометрии меняется связанная с ней геометрии. При этом обеспечивается отдельный контроль доступа к данным, что предотвращает появление несанкционированных изменений в уже утвержденных данных. Это обеспечивает командную работу над проектом и отслеживание изменений в конструкции сопрягаемых деталей на всех стадиях проектирования.

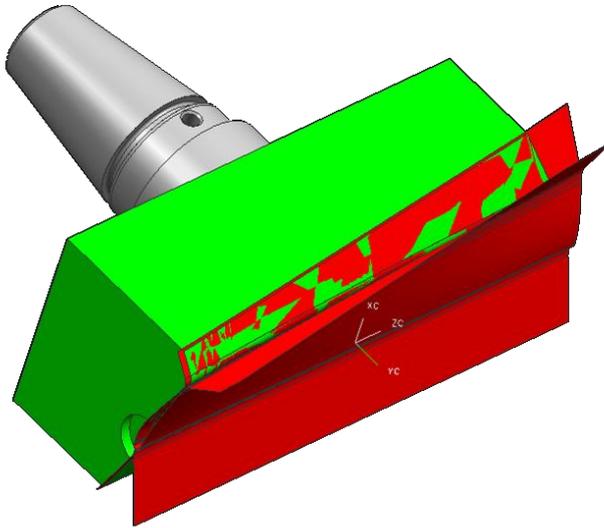


Рисунок 24 РЧ на деталь Электрод.

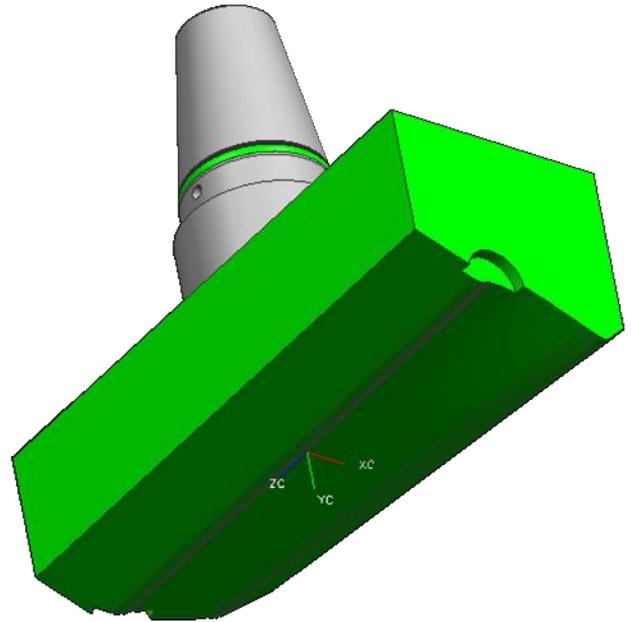


Рисунок 25 ЭМ на деталь Электрод.

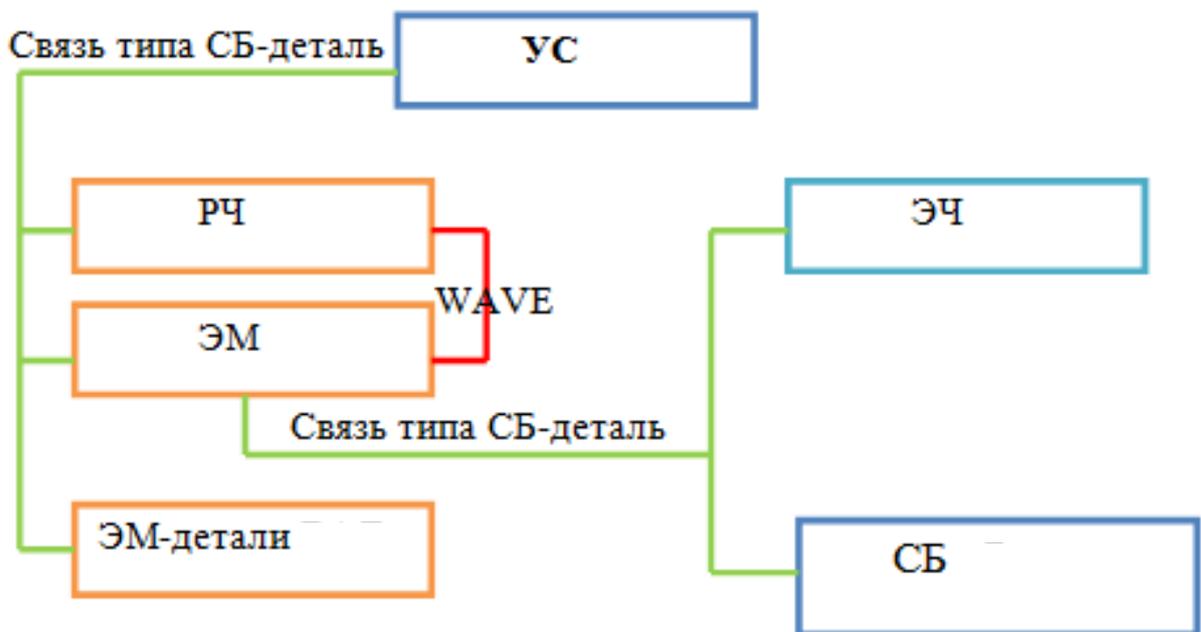


Рисунок 26. Структура связей при разработке конструкции деталей.

Технологические данные хранятся в БД в двух представлениях. Первое представление в виде структур взаимосвязанных объектов БД. Таким образом можно хранить все иерархические таблицы предусмотренные ЕСТД. Вторая форма представления в виде документов, оформленных в соответствии с ЕСТД. Для эффективного использования возможностей автоматизированной системы управления данными необходимо что бы основным представлением являлось представление в виде объектов базы данных, это обеспечит целостность данных. Представление в виде печатных форм может автоматически генерироваться при помощи вспомогательных модулей или с использованием различных табличных или текстовых форматах.

Кроме того, в технологическую документацию входят различные схемы, чертежи, эскизы и тд. Их оформление целесообразно производить используя инструментарий САД-системы, используя БД как источник информации.

Так же существует большой объем технологических данных описывающих процесс обработки в виде формул и таблиц, например, расчет режимов резания. Так как подобная информация необходима службам предприятия для выполнения собственных расчетов (например, норм расхода материалов, трудоемкости и др.) целесообразно хранить такую информацию в виде свойств объектов, в этом случаи будет иметься возможность автоматизированных выгрузок из БД в сторонние системы (например ERP). Реализовать собственно сами расчеты можно или в БД или в сторонней специализированной системе с последующей передачей рассчитанных данных в БД. Передача возможна как в автоматизированном режиме, так и в ручном.

Одним из преимуществ использования единой базы данных является возможность использования уже хранящихся технологий в качестве шаблонов. Это значительно сокращает время на подготовку технологической документации. С помощью пред настроенных шаблонов можно регламентировать какие именно расчеты должны быть проведены, какие свойства изделия должны быть заполнены. С помощью применения шаблонов можно учитывать при разработке технологии наличие такого явления как технологическая наследственность, предлагая

пользователю при создании отдельных операций сразу добавлять дополнительные операции устраняющие негативные эффекты от обработки. Так же при написании технологии на типовые детали, можно использовать уже имеющиеся в БД технологии в качестве шаблона, что значительно сокращает трудоемкость подготовки технологической документации. При высокой степени автоматизации и программирования возможно значительную часть функций по назначению инструмента, режимов обработки полностью автоматизировать.

Выводы по главе.

На основании проведенного исследования разработана методика организации процессов ТПП лопаток компрессоров ГТД на основе CALS-технологий. Методика учитывает необходимость управления ТПП в контексте других этапов ЖЦИ. Методика позволяет реализовать хранение технологических, конструкторских и экспериментальных данных необходимых для проведения ТПП и производства лопаток КВД, а также управление ими с учетом разграничений доступа.

Глава 4. Универсальная автоматизированная система управления ТПП лопаток компрессора ГТД

4.1 Структура данных системы PDM. Модель данных PDM системы Teamcenter

На основании данных создаваемых в процессе разработки технологии изготовления лопаток компрессоров ГТД, а также технологий нанесений покрытий методом МДО на детали агрегатов ГТД рассмотрим формирование структуры данных системы PDM.

В качестве системы PDM будет использоваться система TeamCenter разработки компании SIEMENS PLM, так эта система используется на большинстве предприятий двигателестроения.

Большинство электронных конструкторских документов в системе TeamCenter (ТС) описываются объектами Изделия (Item) или Набором данных системы.

Каждый конструкторский документ детали или сборочной единицы (ДСЕ) описывается отдельным объектом Изделия (Item). Описание атрибутивных и содержательных частей ДТЭ содержится как в объектах типа Item, так и в объектах других типов системы ТС.

Изделие (Item) является объектом верхнего уровня иерархии при представлении структуры данных (ДТЭ) в системе ТС. Структура изделия (Item) является иерархической. Типовая структура Item приводится на рисунке 2.1. Каждый Item содержит не менее одного ItemRevision. ItemRevision содержит полную информацию о данной редакции ДТЭ.

Изделия (Item) подразделяются на типы в зависимости от описываемого вида информации, а также принципов работы с данным объектом в системе.

Описание различных редакций ДСЕ осуществляется элементами данных типа ItemRevision. Структура Item и ItemRevision может содержать различные объекты ТС, а также ссылки на другие Item.

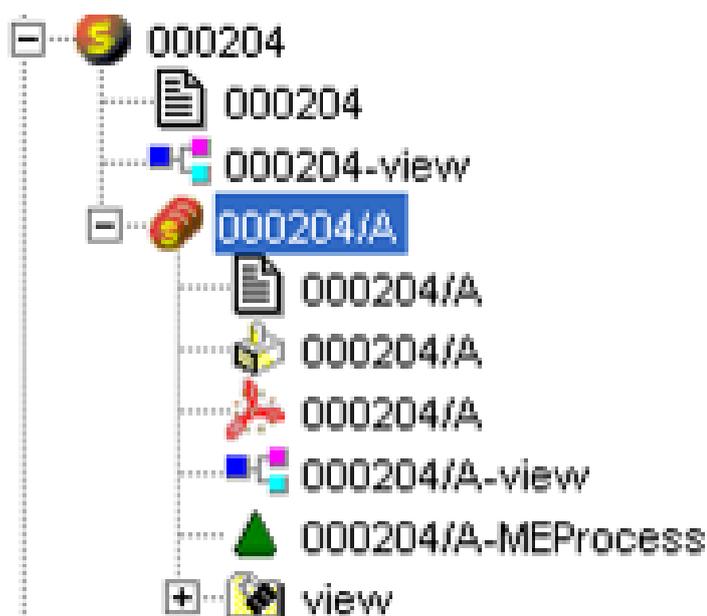


Рисунок 27. Типовая структура Item.

4.1.1 Модель данных для конструкторской структуры изделия

Принципы работы PDM систем строятся на взаимосвязи объектов между собой. При этом во многих случаях в зависимости от начальных настроек системы может зависеть потенциал развития системы. Для ТС в базовой настройке предлагается всего один вид объекта для описания структуры изделия – Item. В стандартах ЕСКД предусматривается большое количество видов и документов описывающих конструкцию изделий. Если в перспективах развития системы предусматривается выпуск конструкторской документации, выполненной по ЕСКД [2,3] необходимо на начальных этапах внедрения создавать такую структуру модели данных, которая максимально соответствует ЕСКД. Кроме того, функционал различных приложений ТС сильно взаимосвязан с типами Item. В следствии с этим, существование одного типа Item в системе ТС было признано недостаточно. Для проекта был использован следующий состав Item системы ТС – таблица 2.1.

Таблица 8. Типы Item для конструкторской структуры изделия в ТС.

Назначение Item	Тип Item (кодировка ru-RU)	Системное обозначение
Сборочные единицы	СЕ	MAI2_Assambly_K
Детали	Деталь	MAI2_Part_K
Документация	Документация	MAI2_Doc_K
Прочие изделия	Прочее	MAI2_OtherPart
Стандартные изделия	Ст. изделие	MAI2_GOST
Материалы	Материал	MAI2_Mat
Комплекты	Комплект	MAI2_Kit
Прочие данные, не представленные в данной таблице	Item	

На крупных предприятиях авиационного двигателестроения общепринятой практикой на начальных этапах внедрения системы ТС является повторение в системе всех атрибутов документов, предусмотренных ЕСКД и стандартами по документообороту предприятия. При реализации данного проекта было принято решение, на начальном этапе, создать такую «модель данных» ТС которая могла бы быть настроена под широкий спектр задач. В связи с этим было принято решение не использовать для хранения атрибутов системные объекта Item Master Form и ItemRevision Master Form, а хранить все необходимые атрибуты на самом объекте Item (рисунок 28).

Последний изменяющий пользователь:  [Ионов Алексей Владимирович \(ionov_av\)](#) ▼

Представления спецификации:  РЦМАИ015012003-View

Текущее имя: КРЫЛЬЧАТКА

Текущее описание: РСМАИ015012003

Текущий идентификатор: РЦМАИ015012003

Тип: Деталь ▼

Рисунок 28. Атрибуты Item.

Основными атрибутами системы ТС для объектов, описывающих конструкцию являются: Обозначение, Наименование, Тип (Тип Item) и материал.

Одной из насущных проблем при создании конструкторской документации в электронном виде является присвоение материалов, из которых должна изготавливаться деталь, информационным объектам в БД и ассоциативная связь с системой CAD, что необходимо для сохранения единства данных. На данный момент реализована ассоциативная связь между БД материалов системы ТС (см. раздел «Классификатор») и ItemRevision конкретной детали. Для этого создан специальный вид отношений для ItemRevision – MAI2_Material. В системе данный вид связи отображается как объект типа «папка» (рис. 29). При размещении в этой папке объекта типа «Материал» происходит автоматическое заполнение соответствующего атрибута ItemRevision (рисунок 30).

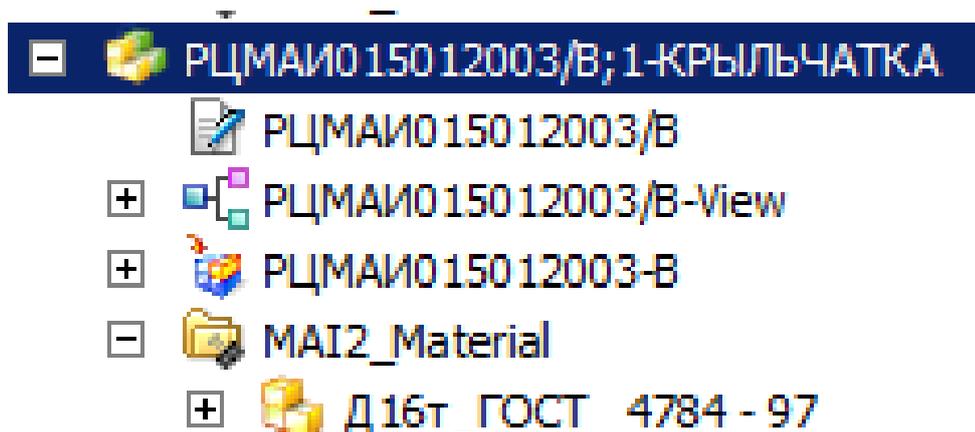


Рисунок 29. Отображение материала, ассоциированного с ItemRevision.

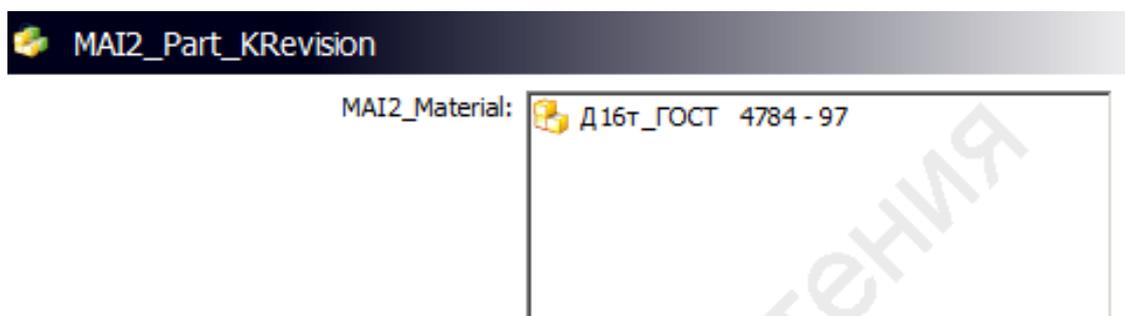


Рисунок 30. Авто-заполнение свойства материал ItemRevision.

Для формирования взаимосвязей между объектами в терминах родитель-потомок (аналог известного графического представления в виде конструкторского документа – «Спецификация») формируется в специализированном приложении системы ТС «Менеджер структуры» (рис. 31).

Строка спецификации	Колич...	Статус модификации ...	Порядковы...
0420700200К007- УСТАНОВКА КОКА (view1)		Construct	
042070200СВК001-СБОРОЧНЫЙ ЧЕРТЕЖ		Construct	
042070040К003-КОК ПЕРЕДНИЙ (view) x 1	1	Construct	1
042070050К001-КОК ЗАДНИЙ (view) x 1	1	Construct	2
042070006К001-ДНИЩЕ x 1	1	Construct	4
020015115К001-ВИНТ x 12	12	Construct	5
863150561408К001-ВИНТ 6-14-СР ОСТ 1 31505-80 x 27	27	Construct	7
861239306126К001-ШАЙБА 6-12-ХИМ.ПАС. ОСТ 1 12393 x 21	21	Construct	8
ГК001 x 100	100		10

Рисунок 31. Пример структуры СЕ в приложении «менеджер структуры».

Функциональность данного приложения достаточна для выполнения проекта и вследствие этого его дополнительной настройки не производилась.

При выполнении проекта в системе PDM была размещена следующая конструкторская информация:

- 3D-модели лопаток различных по конструкции и размерам, различных двигателей, всего около 15 рабочих лопаток компрессоров ГТД (рис. 32).

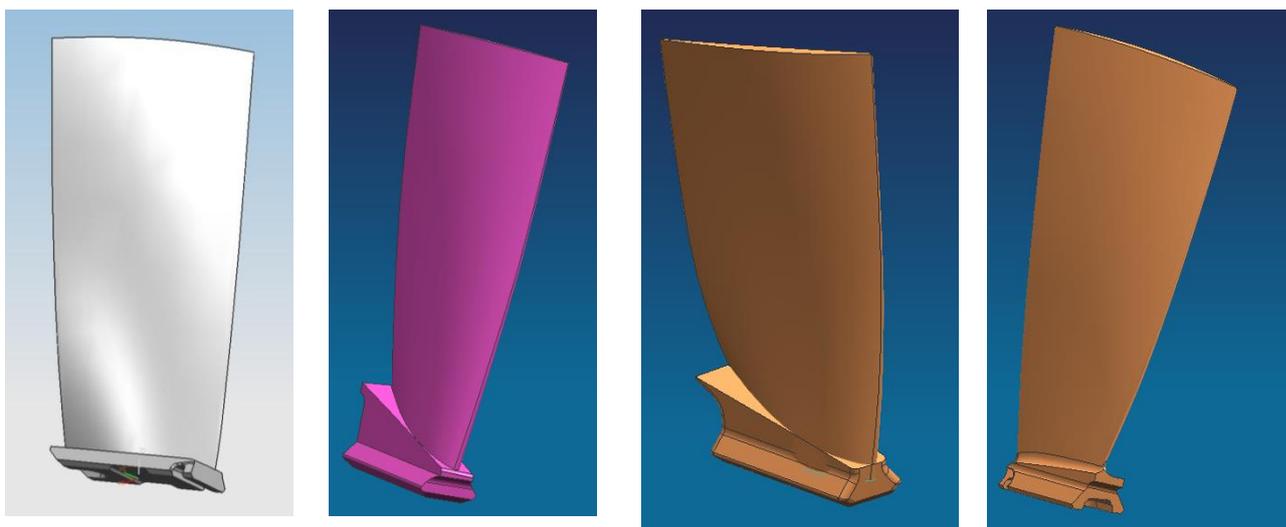


Рисунок 32. Пример лопаток ГТД в PDM системе.

На основании архива лопаток ГТД в PDM системе проводится типизация конструкций с целью формализации принципов определения предпочтительной технологии с точки зрения технологических критериев.

4.1.2 Модель данных системы ТС для технологической структуры изделия и структура производственного процесса

Известно [55] что технологическая структура изделия и конструкторская структура могут отличаться. Это может быть связано как с особенностью изделия, так и с особенностями техпроцессов конкретного предприятия.

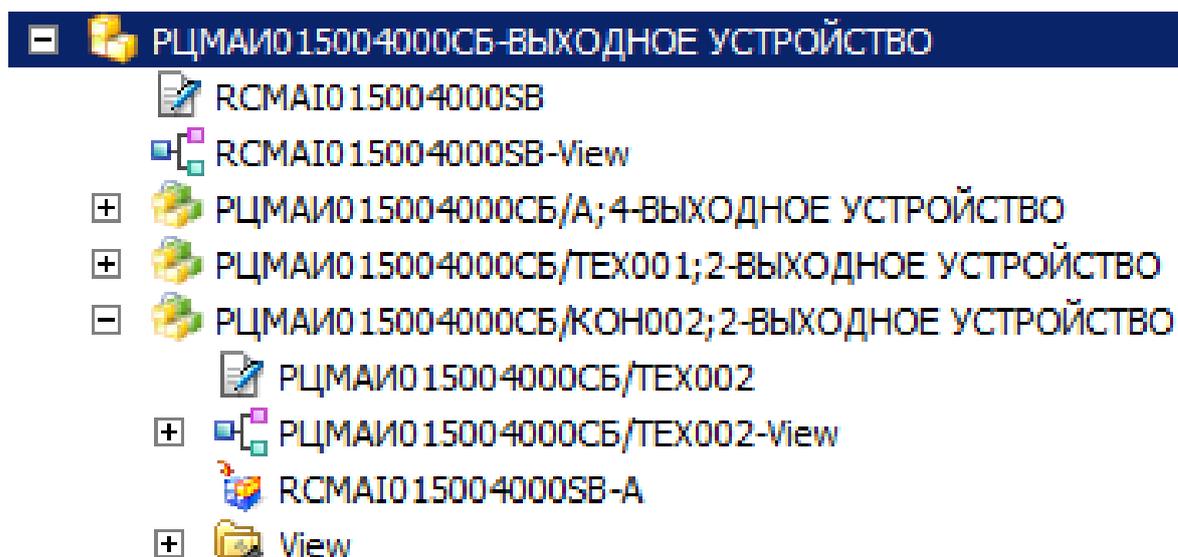


Рисунок 33. Структура модификаций Item.

Сборочная единица в конструкторском представлении может отличаться от технологического представления, для этого разработанной моделью данных ТС предусмотрено разделение ItemRevision на конструкторские и технологические (рис. 33). Для этого используется атрибут «модификация» (рис. 34). В терминах проекта возможны следующие варианты заполнения этого атрибута:

- А, В, С и т.д. – рабочие модификации, для хранения промежуточных наработок (не утверждаемые);
- КОН001, КОН002 и т.д. – конструкторские модификации;
- ТЕХ001, ТЕХ002 и т.д. – технологические модификации;

Идентификатор:

Модификация:

Рисунок 34. Атрибут «Модификация» ItemRevision.

Для управления составами изделия применяется методика управления составом на основе статусов изделия. При таком подходе за счет применения различных видов статусов и специальных атрибутов, созданных для объекта типа

«статус» системы ТС возможно выполнять конфигурирование структуры изделия по правилам. Под конфигурацией по «правилам» понимается отображение структуры в соответствии, с какими-либо условиями, например: конфигурирование по последним модификациям, по дате создания, по статусам выпуска и др.

У объектов «Статус» в Teamcenter Engineering, помимо вида статуса есть еще свойство (объект) «Применяемость» («Effectivity»). Основное предназначение этого свойства – указание на условия, в которых этот статус (или объект Item с таким статусом) будет применяться.

Release Status по умолчанию имеет зависимый объект «Применяемости» («Effectivity»). Он может иметь атрибуты:

- по дате, с указанием диапазона дат применяемости или одну дату и указанием что применять всегда до (после) этой даты;
- применяемость по серии и конечному изделию, когда указывается конечное изделие, куда входит данный ItemRevision (на верхнем уровне входимости) и вводится номер серии или диапазон серий, в которых применяется данный ItemRevision.

Для формирования структуры производственного процесса в системе ТС применяются специализированные приложения – «Планировщик процессов изготовления» и «Планировщик процессов сборки». Планировщик процессов сборки предназначен в основном для автоматизированных производственных линий и в данной работе не рассматривается.

- Модель данных производственного процесса основана на собственной терминологии и включает несколько взаимосвязанных типов процессов и операций, а также другие понятий:
- Производственный процесс (Manufacturing process). Совокупность операций по производственному процессу, которые тесно связаны друг с другом. Используется, чтобы сгруппировать операции в логические группы. Модель полного производственного плана и

описывает, как и где продукт произведен. Содержит информацию о том, как элементы структуры предприятия используются и где. Устанавливает связи между изделием, расположением производственного участка и ресурсами, необходимыми, чтобы произвести продукт. Операции и ресурсы могут быть разделены несколькими процессами. По аналогии с термином bill of materials (BOM) для производственного процесса используется термин bill of process (BOP), что позволяет использовать функционал доступный для BOM и для BOP.

- Операция (Process operation). Этап производственного процесса описывает элемент техпроцесса выполняемый на одном рабочем месте (с применением одной единицы основного оборудования, вида обработки и т.д.). Система ТС позволяет разбивать одну операцию на отдельные этапы – activities, аналогом которых в ЕСТД является термин «переход
- Переход (Operation activities). Технологический переход представляет собой законченную часть технологической операции, выполняемую над одной или несколькими поверхностями заготовки, одним или несколькими одновременно работающими инструментами без изменения или при автоматическом изменении режимов работы станка. Полное время операции вычисляется по времени начала и продолжительности каждого перехода.
- Рабочее место (Workstation). Аналог понятия «участок» - зона в цехе в которой выполняется один вид производственных работ.
- Завод (Plant). Иерархическая совокупность всех производственных подразделений предприятия.
- Рабочая зона (Work area). Конкретное рабочее место на в орг.структуре предприятия оснащенное одной единицей основного оборудования.

- Ресурсы (Resource). Совокупность инструментов, приспособлений, оборудования необходимого для производственного процесса.

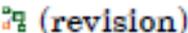
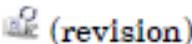
Item	Symbol
Product	
Process	  (revision)
Operation	 (BOM view revision)
Activity	
Plant or work area	
Resource	
NC machining	  (revision)

Рисунок 35. Типы Item для процессов производства изделий применяемые

Выше изложенным понятиям соответствуют объекты БД ТС. Приведем основные типы Item для процессов производства изделий, применяемые в данном проекте – рисунок 35.

Интерфейс формирования ВОР близок к интерфейсу формирования ВОРМ.

Для выполнения проекта в PDM системе размешена следующая технологическая информация:

- Объекты типа «Ресурсы» описывающие основное технологическое оборудование, используемое для изготовления лопаток компрессоров ГТД.
- Маршрутная технология изготовления экспериментальной лопатки ГТД в виде объектов БД ТСЕ «Производственный процесс» и «Операция», а также маршрутная технология в виде бланков, выполненных по ГОСТ.

Структура процесса		Позиция
000077/A; 1-ЛОПАТКА КВД (View)		
🔧	000078/A; 1-ЗАГОТОВИТЕЛЬНАЯ	10
🔧	000079/A; 1-ГОРИЗОНТАЛЬНО-ФРЕЗЕРНАЯ	20
🔧	000080/A; 1-ГОРИЗОНТАЛЬНО-ФРЕЗЕРНАЯ	30
🔧	000081/A; 1-ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНАЯ	40
🔧	000083/A; 1-ПРОТЯЖКА ЗАМКА	50
🔧	000084/A; 1-ПРОМЫВКА	60
🔧	000082/A; 1-ФРЕЗЕРНАЯ С ЧПУ	70
🔧	000085/A; 1-ПОДРЕЗКА ТОРЦЕВ	80
🔧	000086/A; 1-ПРОМЫВКА	90
🔧	000089/A; 1-ПОЛИРОВАЛЬНАЯ	100
🔧	000090/A; 1-ПРОМЫВКА	110
🔧	000091/A; 1-СММ КОНТРОЛЬ	120
🔧	000092/A; 1-КЛЕЙМЕНИЕ	130

Рисунок 36. Маршрутная технология в системе PDM.

Изм. № техн.		Попл. дата		Взам. изм. №		Изм. № дубл.		Попл. и дата		500.011.40.00003											
МАРШРУТНАЯ КАРТА (последующие листы)										Дет. № 0700129126		500.011.40.00003									
Цель	Участки	Номер операции	НАИМЕНОВАНИЕ И СОДЕРЖАНИЕ ОПЕРАЦИИ	Обозначение документа	Оборудование (код, наименование, инвентарный номер)	Кодиф. штучного изделия		Код профес-сий	Средств работы	Кодовый материал	Кодовый материал	Кодовый материал	Кодовый материал	Кодовый материал	Кодовый материал	Объем приращен. сырья	Т.п.з.				
						Код профес-сий	Код профес-сий										Т.п.з.	Т.шт.			
		ЛКТ 045	Слесарная	500.601.4262.00012																	
		ЛКТ 050	Вертикально-сверлильная	500.601.4262.00013																	
		ЛКТ 053	Фрезерная с ЧПУ	500.601.0108.00014																	
		ЛКТ 060	Контроль	500.601.4181.00015																	

Рисунок 37. Маршрутная технология на бланках по ГОСТ.

4.2 Хранение экспериментальных данных

Отдельно хотелось бы остановиться на проблеме хранения экспериментальных данных.

Первая особенность хранения экспериментальных данных связана с появлением наряду с конструкторским и технологическим составом изделия, состава, описывающего конструкцию исследуемого образца. Это обусловлено внесением изменений в конструкцию образца в зависимости от условий проведения исследования, например, расположения датчиков на объекте исследования. Эта проблема может быть решена за счет применения конфигурирования изделия по статусам. При таком подходе конструкция экспериментального образца основана на конструкторской структуре и выполняется по всем правилам, разработанным для нее.

Вторая особенность связана с необходимостью иметь в БД ТС информацию о стендовой части, предназначенной для проведения экспериментов. Для некоторых задач проведения сложных исследований решение этой проблемы может требовать наличие в БД информации о архитектуре помещений для увязки экспериментальной базы и объекта исследований. Для решения этих проблем предполагается использовать возможности приложения «Планировщик процессов сборки» функционал, которого обладает прикладными средствами для решения схожих задач в разрезе производства.

Хранение результатов экспериментов предусмотрено в виде файлов форматов: *.jpeg, *.doc, *.xls (рис. 38). Это позволяет хранить все виды отчетов и таблиц с данными. Кроме того, предусмотрено хранение файлов с расширением *.rar (файлы архивов), что позволяет хранить не классифицированные в системе данные произвольных форматов и больших объемов.

Для каждого эксперимента в системе ТС создается экземпляр Item с типом «процесс», с которым ассоциируются необходимые данные.

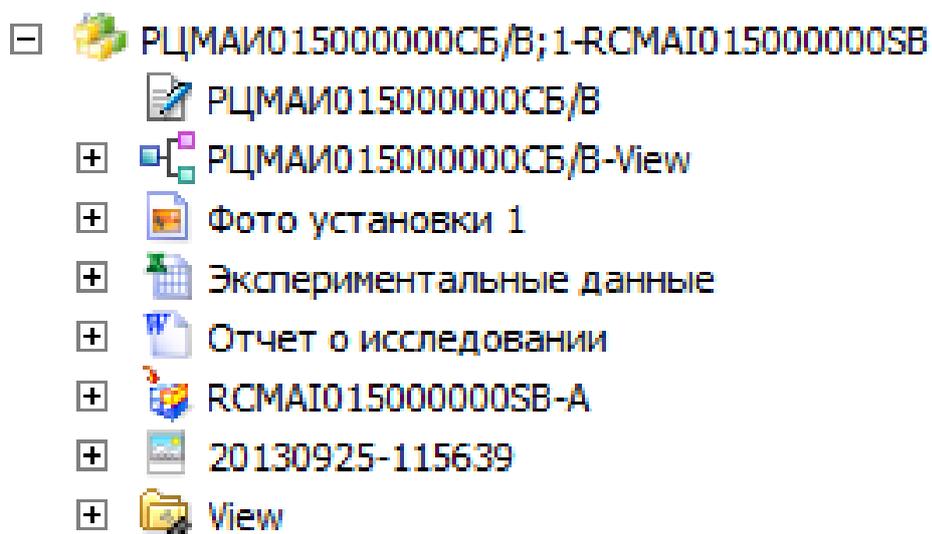


Рисунок 38 Хранение в ТС файлов в форматах: *.jpeg, *.doc, *.xls.

Кроме того, предложенная методика применяется и для хранения данных численных экспериментов.

Для выполнения проекта в PDM системе размещена следующая экспериментальная информация:

- Маршрутная технология подготовки образцов для исследования:
 - Лопаток компрессоров ГТД для исследований на предел циклической прочности.
 - Лопаток ГТД для исследования остаточных напряжений в поверхностном слое.
- Результаты исследований образцов в виде:
 - Необработанных данных полученные во время проведения исследований.
 - Обработанные данные исследования в виде отчетов.

4.3 Хранение нормативно-справочной информации в ТС. Структура приложения «Классификатор»

Имеется общая проблема для хранения экспериментальных данных и формирования техпроцессов изготовления и сборки изделий – большое количество справочной информации необходимой для работы и использование

стандартизованных деталей, изделий и процессов. Эта проблема решается за счет применения специального приложения ТС – «Классификатор».

Приложение «Классификатор» предназначено для хранения данных о стандартных и нормализованных деталях, таких как шайбы, фрезы, датчики, станки и др.

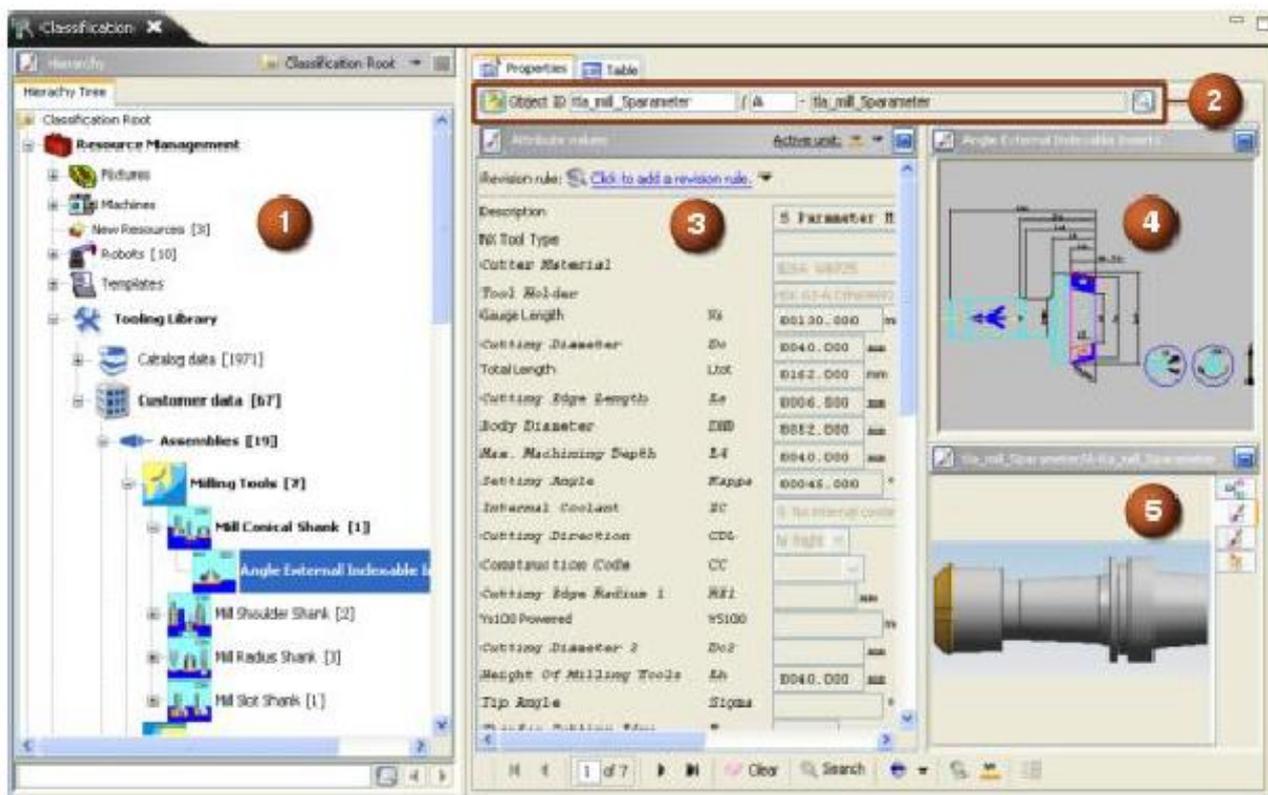


Рисунок 39 Общий вид окна классификатора: 1-дерево классификации, 2-сторона поиска, 3-свойства объекта в классификации, 4,5 – графическое описание объекта классификации.

Каждое предприятие формирует структуру классификатора в соответствии со своими потребностями. Разработка структуры и ее наполнение очень трудоемкий процесс.

Для выполнения проекта была разработана структура классификатора. Структуру классификатора создаётся администраторами системы, и не доступна для правки пользователями. Пользователям предоставляется возможность классифицировать объекты. Многие приложения ТС дают возможность работать с некоторыми типами объектов БД, только в случае если они классифицированы в приложении «Классификатор». Например, при добавлении инструмента и

приспособлений в приложении «Планировщик процессов изготовления». Пример окна приложения «Классификатор» приведено на рисунке 39. В левой части экрана представлена структура классификатора. В правой части в БД найден классифицированный объект – датчик давления ПД-Р и отображены его свойства в соответствии со структурой классификатора. Свойства для объектов настраиваются внутри каждого класса классификации, что позволяет для каждого отдельного класса иметь свой набор ключевых атрибутов по которым производится поиск в БД. Кроме того, с помощью классификатора возможно осуществлять подбор объектов в БД по диапазону параметров – например выбрать из классификатора все датчики давления которые имеют предел измерения в 5 кПа, измеряют избыточное давление и имеют токовый выходной сигнал (рисунок 40).

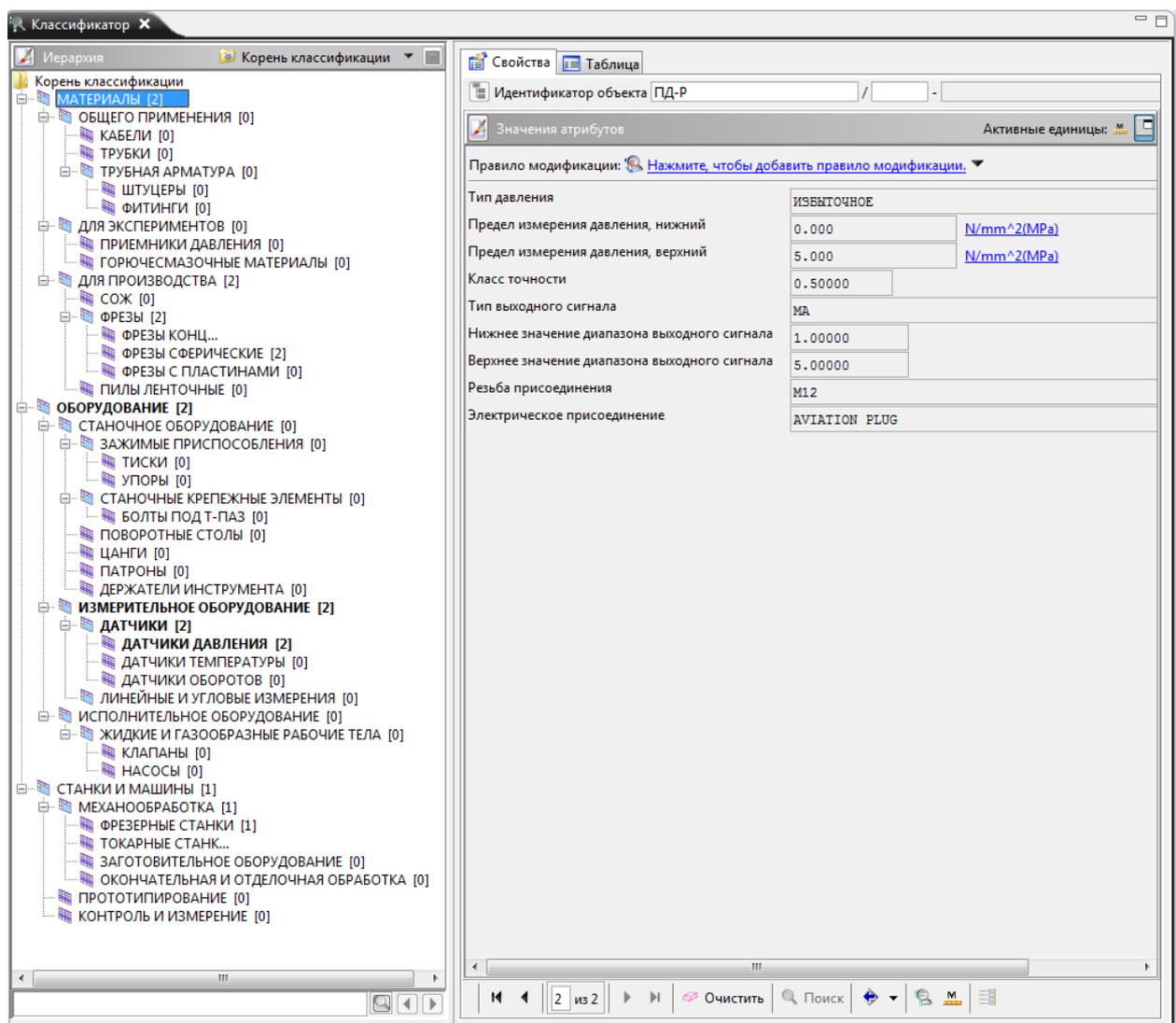


Рисунок 40 Дерево классификации и пример поиска в классификаторе.

4.4 Инженерные бизнес-процессы (work-flow) в ТС

Для реализации бизнес-процессов в системе Teamcenter Engineering имеется средство WorkFlow. В рамках Workflow происходит определение типов данных участвующих в процессе, назначаются пользователи - участники процесса, задаются права доступа, определяется маршрут передвижения объектов по этапам процесса. Создание Workflow (далее по тексту WF) преследует цель максимально формализовать БП предприятия в среде TeamCenter.

Принципы работы с WF основаны на организационной структуре предприятия. В системе ТС выделяются следующие элементы описания орг.структуры предприятия:

- группа;
- роль;
- пользователь;
- персона;

К каждой группе могут относиться подгруппы, роли или пользователи. К роли могут относиться только пользователи. Одна персона может относиться к нескольким пользователям. Персона соответствует конкретному сотруднику компании. Организационная структура очень тесно связана с настройкой прав доступа, организацией WF, настройкой интерфейса системы (имеется возможность настроить интерфейс под конкретные группы или роли пользователей) и др.

В рамках выполнения проекта создан work-flow (WF) необходимый для проведения утверждения Item в БД. После завершения WF объектам присваивается статус «Released». Наличие «статуса» - специального объекта в модели данных БД, позволяет с помощью управления правами доступа запретить изменения утвержденных объектов и управлять конфигурациями изделий.

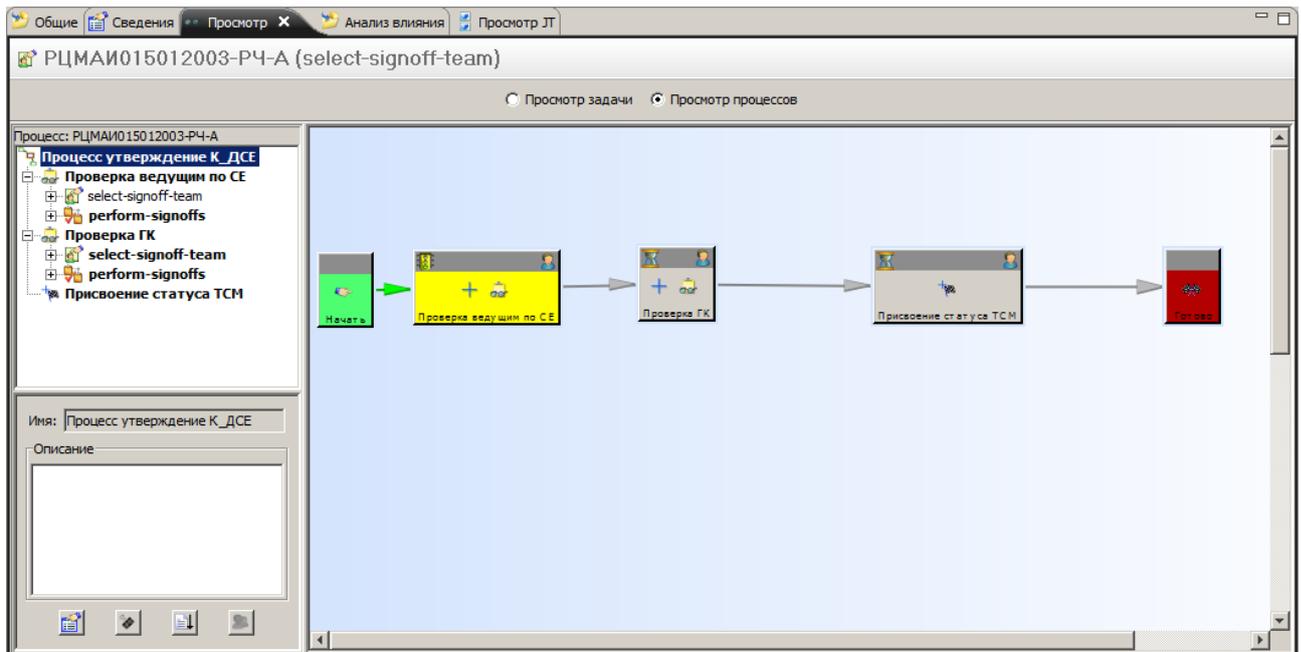


Рисунок 41 Work-flow по утверждению объектов БД ТСЕ для проекта ВРД МТ.

WF разделен на три этапа (рис. 39). На первом этапе пользователь-разработчик ДСЕ выбрав объекты, которые необходимо утвердить (Item, ItemRevision, модели NX и др.), начинает процесс утверждения. После того как объекты подключены к WF их изменение блокируется на уровне системных настроек доступа.

Пользователь-создатель процесса назначает ответственного проверяющего, как правило, это разработчик вышестоящего сборочного узла.

Проверяющий пользователь, принимает решение об утверждении или отклонении, присланных ему по WF объектов. При принятии решения об отклонении в задаче утверждения, WF возвращается на предыдущий этап с комментариями о причине принятия такого решения. В случае принятия положительного решения на втором этапе, процесс переходит на третий этап – утверждение руководителем проекта. Так же как и на втором этапе, руководитель проекта имеет возможность принять решение об отклонении присланных объектов. При принятии положительного решения руководителем проекта объектам из папки «Цели» процесса присваивается статус «Released».

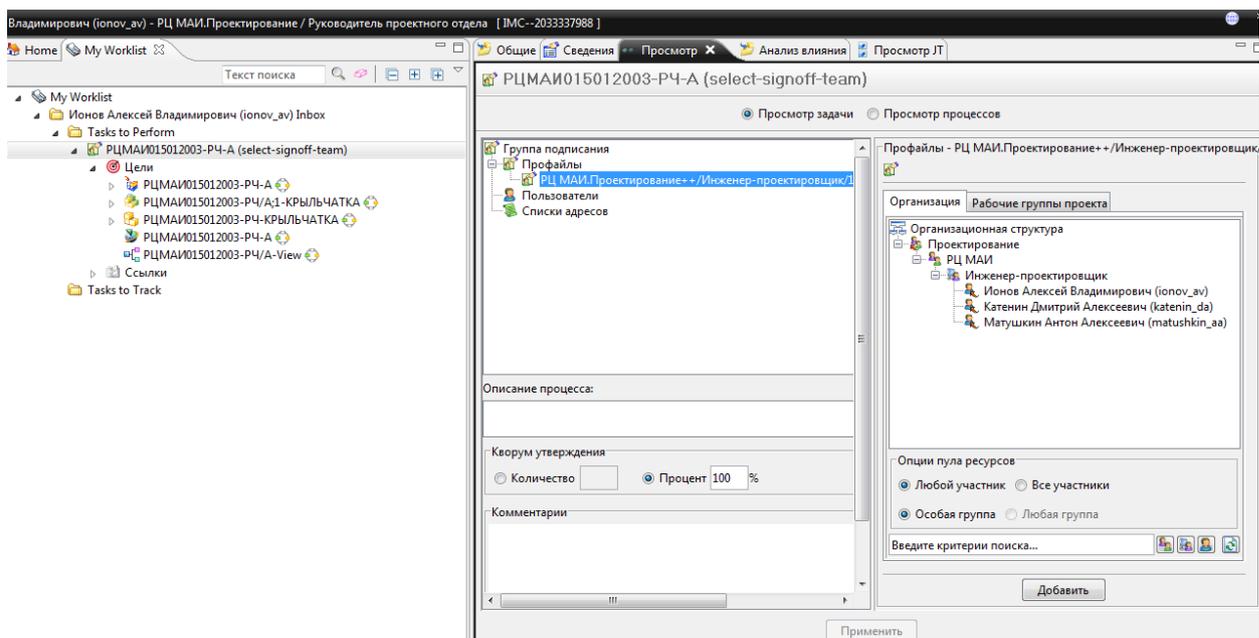


Рисунок 42 Окно пользователя при работе с Work-flow. Задача назначения пользователей.

Проверяющий пользователь, принимает решение об утверждении или отклонении, присланных ему по WF объектов. При принятии решения об отклонении в задаче утверждения, WF возвращается на предыдущий этап с комментариями о причине принятия такого решения. В случае принятия положительного решения на втором этапе, процесс переходит на третий этап – утверждение руководителем проекта. Так же, как и на втором этапе, руководитель проекта имеет возможность принять решение об отклонении присланных объектов. При принятии положительного решения руководителем проекта объектам из папки «Цели» процесса присваивается статус «Released».

Данный WF позволяет утверждать любые объекты БД ТС. После присвоения статуса изменить объекты не может ни один пользователь системы. Снять статус (удалить) может только администратор системы при использовании особых прав доступа. При необходимости с помощью настройки прав доступа возможно делегировать эти права другим пользователям, но как правило это не применяется с целью сохранения единства данных в системе.

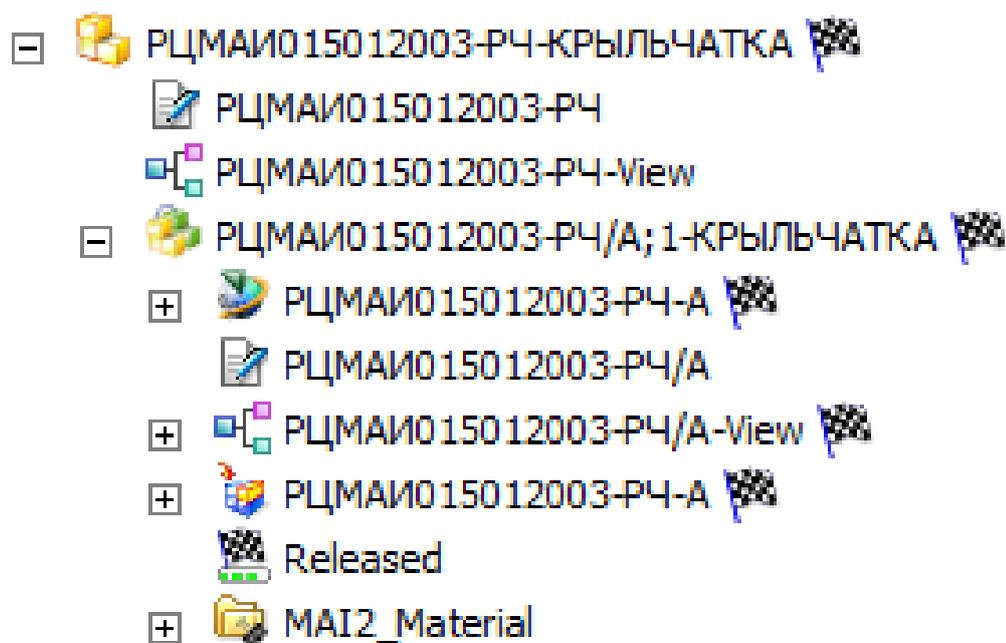


Рисунок 43 Объекты БД ТС (с флажком) которым присвоен статус «Released».

4.5 Экспериментальное исследование образцов

4.5.1 Исследование поверхностных остаточных напряжений в лопатках компрессора ГТД

Все работы по исследованию образцов выполнены центральной измерительной лабораторией ОАО «ММП им. В.В.Чернышева».

Образцы для исследования вырезаны электроэрозионным способом проволочным электродом. Измерение остаточных напряжений проводилось на установке SRS-01 комплекс, прошедшей метрологические испытания для титановых сплавов (Свидетельство №4 от 17.11.2009), в соответствии с Руководством по эксплуатации № 5504.09.04.019РЭ при гальваностатическом режиме травления с плотностью тока $0,15 \text{ A/cm}^2$.

4.5.1.1 Исследование образцов лопаток ВНА полученных методом ЭХО и фрезерования.

Для исследования представлены лопатки ВНА обработанные ЭХО и фрезерованием. Все лопатки прошли финишную обработку ручным полированием. Материал лопаток – ВТЗ-1. Количество представленных лопаток – по две штуки каждого наименования.

Количество образцов вырезанных из лопаток ВНА обработанной методом ЭХО – 16 шт. Размеры образцов 35×4 мм. Каждый образец исследован только с одной стороны: либо со стороны спинки, либо со стороны корыта. Образцы имели шифр «ЭХО», содержащий порядковый номер лопатки (1 или 2), порядковый номер образца и указание исследуемой поверхности («спинка» или «корыто»).

Длина травления составляла 20 мм, для увеличения чувствительности схемы крепления использован удлинитель 49 мм.

Количество образцов вырезанных из лопаток обработанной фрезерованием – 6 шт.

Размеры образцов 25×4 мм и 30×4 мм. Образец, вырезанный ближе к оси и имеющий наибольшую толщину, исследовался как со стороны спинки, так и со стороны корыта.

Все образцы исследовались до глубины 120 мкм.

В таблицах 9 и 10 приведены значения поверхностных остаточных напряжений в МПа, а на рис. 44 и 45 представлены эпюры остаточных напряжений лопаток для спинки и корыта соответственно для лопатки, обработанной ЭХО.

В таблице 11 приведены значения поверхностных остаточных напряжений, полученные для лопаток, обработанных фрезерованием. Эпюры остаточных напряжений для спинки и корыта соответственно представлены на рис.46 и 47.

Таблица 9. Поверхностные остаточные напряжения.

Глубина	Остаточные напряжения, МПа								ЭХО – спинка
	ЭХО_2_4с	ЭХО_2_3с	ЭХО_2_2с	ЭХО_2_1с	ЭХО_1_4с	ЭХО_1_3с	ЭХО_1_2с	ЭХО_1_1с	
2	-97	-496	-196	-160	-188	-151	-421	-338	-256
5	-42	-137	-79	-43	-218	-133	-160	-172	-123
10	6	-35	-15	3	-57	-44	-30	-44	-27
20	18	-7	3	12	4	-6	1	-8	2
30	18	2	6	12	6	-10	-4	0	4
40	18	1	3	12	0	0	-2	3	4
50	18	2	-4	12	-3	3	-1	6	4
60	17	4	4	12	-15	2	-1	5	4
70	17	3	-6	12	-10	1	-2	5	3
80	16	5	-11	12	-1	0	2	6	4
90	15	5	-3	12	2	0	1	6	5
100	13	5	1	12	1	0	0	6	5
120	2	6	3	11	5	0	2	6	4

Таблица 10 Поверхностные остаточные напряжения.

Глубина	Остаточные напряжения, МПа								ЭХО_корыто
	ЭХО_2_8к	ЭХО_2_7к	ЭХО_2_6к	ЭХО_2_5к	ЭХО_1_8к	ЭХО_1_7к	ЭХО_1_6к	ЭХО_1_5к	
2	-89	-285	-111	-338	-115	-145	-298	-63	-181
5	-23	-99	-67	-93	-30	-58	-45	-4	-52
10	11	-12	-4	-13	0	-16	-3	11	-3
20	15	-4	4	0	6	-3	4	15	5
30	18	-8	5	3	8	8	3	16	7
40	20	-6	7	2	8	11	-2	15	7
50	18	1	8	1	8	11	-10	15	7
60	17	2	8	0	8	9	-13	14	6
70	12	4	8	0	8	4	-16	14	4
80	8	6	7	-2	7	-7	-4	12	3
90	-6	6	7	-2	8	-8	2	1	1
100	-2	7	7	0	7	-4	5	0	3
120		6	7	3	8	-16	9	0	2

Таблица 11. Поверхностные остаточные напряжения.

Глубина	Остаточные напряжения, МПа								
	ФРЕЗ_2_2_2с	ФРЕЗ_1_2_2к	ФРЕЗ_2_1с	ФРЕЗ_1_1к	ФРЕЗ_2_2_1к	ФРЕЗ_2_1к	ФРЕЗ_1_2_1с	ФРЕЗ_1_1с	ФРЕЗ_среднее
2	-180	-155	-89	-32	-210	-216	-123	-214	-152
5	-73	-64	-29	-159	-55	-75	-93	-88	-80
10	-9	-9	-8	-52	0	-2	-32	-7	-15
20	5	1	4	-1	3	7	-1	2	3
30	3	4	5	2	3	4	2	4	3
40	4	2	5	3	-2	4	5	4	3
50	6	4	6	3	1	5	5	4	4
60	7	4	5	4	0	6	5	5	5
70	9	5	6	6	-2	8	3	6	5
80	9	5	6	4	0	8	2	7	5
90	10	4	4	4	0	8	2	7	5
100	10	6	4	4	2	8	2	7	5
120	10	5	3	4	2	9	2	8	5

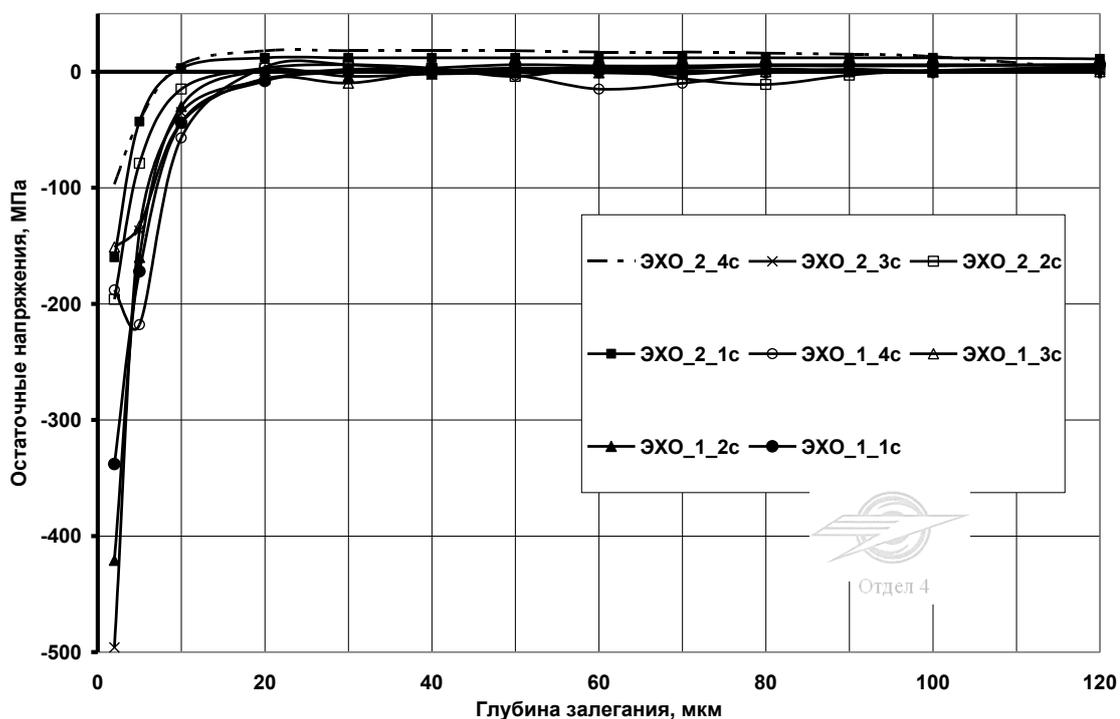


Рисунок 44 Распределение остаточных напряжений.

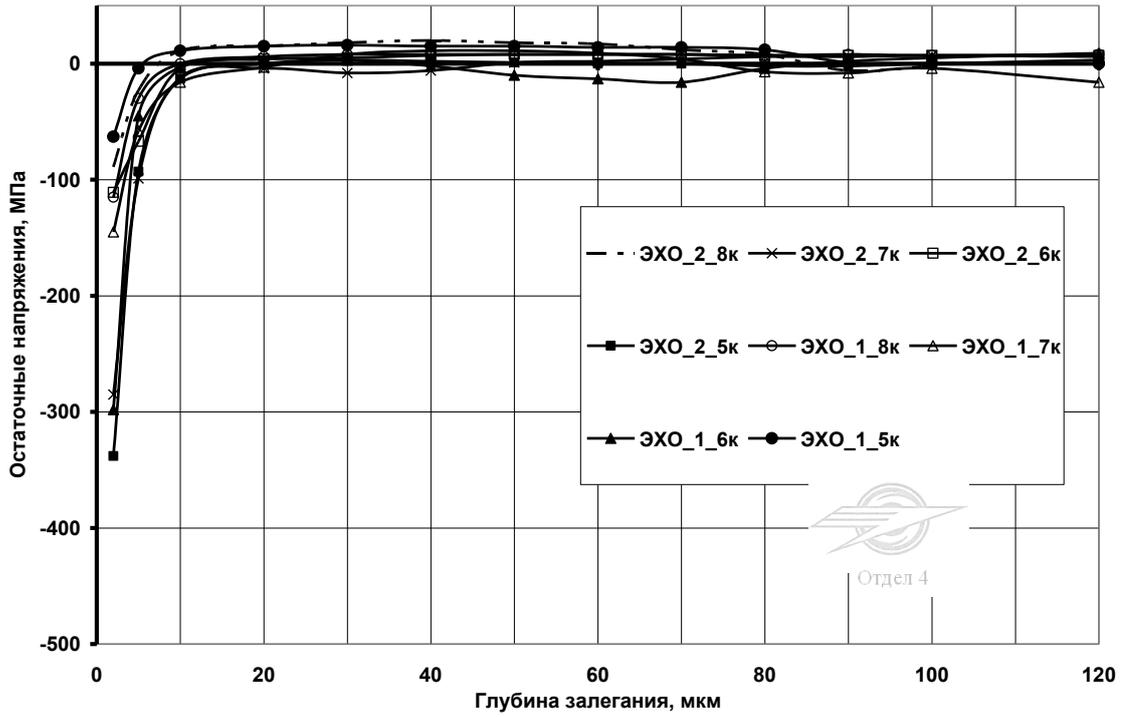


Рисунок 45 Распределение остаточных напряжений.

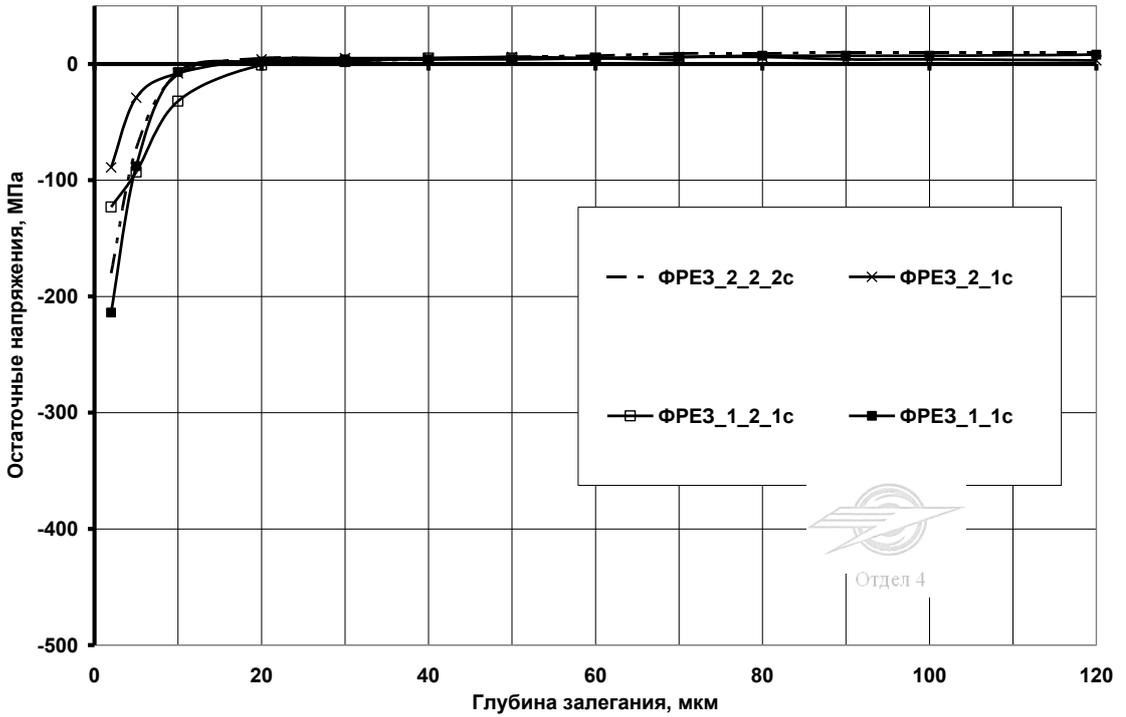


Рисунок 46 Распределение остаточных напряжений.

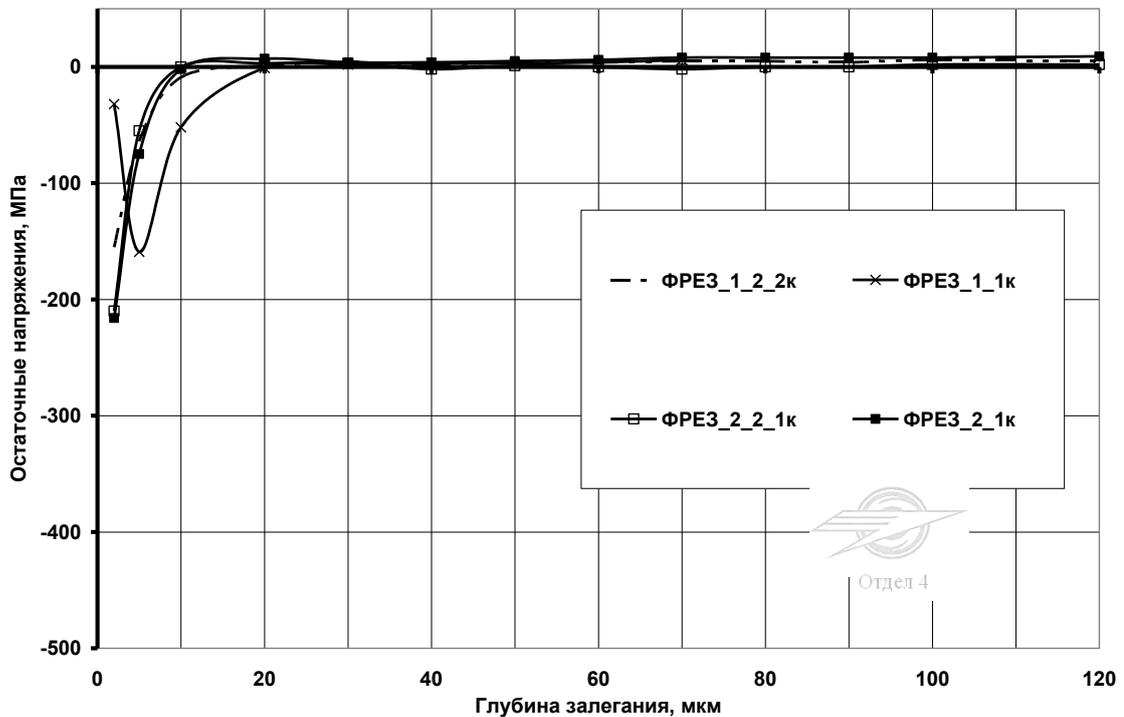


Рисунок 47 Распределение остаточных напряжений.

На всех исследованных образцах, которые имели финишное ручное полирование, как после ЭХО, так и после фрезерования обнаружены благоприятные напряжения сжатия одинакового характера (табл.11, переходящие в небольшие растягивающие напряжения на глубине 17,5 мкм.

Существенных отличий в напряжённом состоянии поверхности исследуемых лопаток не обнаружено.

Все контролируемые параметры у лопаток ВНА после ЭХО и лопаток после фрезерования, имевших финишную обработку ручным полированием, близки и полностью соответствуют нормам ЦИАМ – таблица 17 [39].

Анализ напряжённого состояния спинки и корыта по эюграм рис. 46 и рис. 47 показывает, что у лопаток, обработанных ЭХО, отличия напряжений спинки от напряжений в корыте более выражено. Для лопаток после фрезерования, по усреднённым значениям остаточных напряжений, спинка и корыто находятся в одинаковом состоянии, что является более благоприятным фактором при эксплуатации.

Статистическая обработка результатов измерения поверхностных остаточных напряжений – расчёт доверительных интервалов – показывает, что даже при меньшем размере выборки ($n=8$), лопатки после фрезерования имеют меньший

доверительный интервал, а, следовательно, большую стабильность обработки поверхности.

4.5.1.2 Исследование образцов рабочих лопаток с пером полученным методом фрезерования.

Лопатка компрессора 3 ступени. Для исследования представлены лопатки в количестве 2 шт. Лопатки изготовлены по технологии фрезерования профиля пера на станке Willemin-Macodel W-518ТВ (Режимы обработки $N=3750$ об/мин (частота вращения шпиндели), $F = 1140$ мм/мин (минутная подача)), финишная обработка профиля пера- виброшлифование и виброглянцевание.

Материал лопаток ВТ8М.

Обработка результатов исследований проводилась аналогичными методами что и для лопаток ВНА.

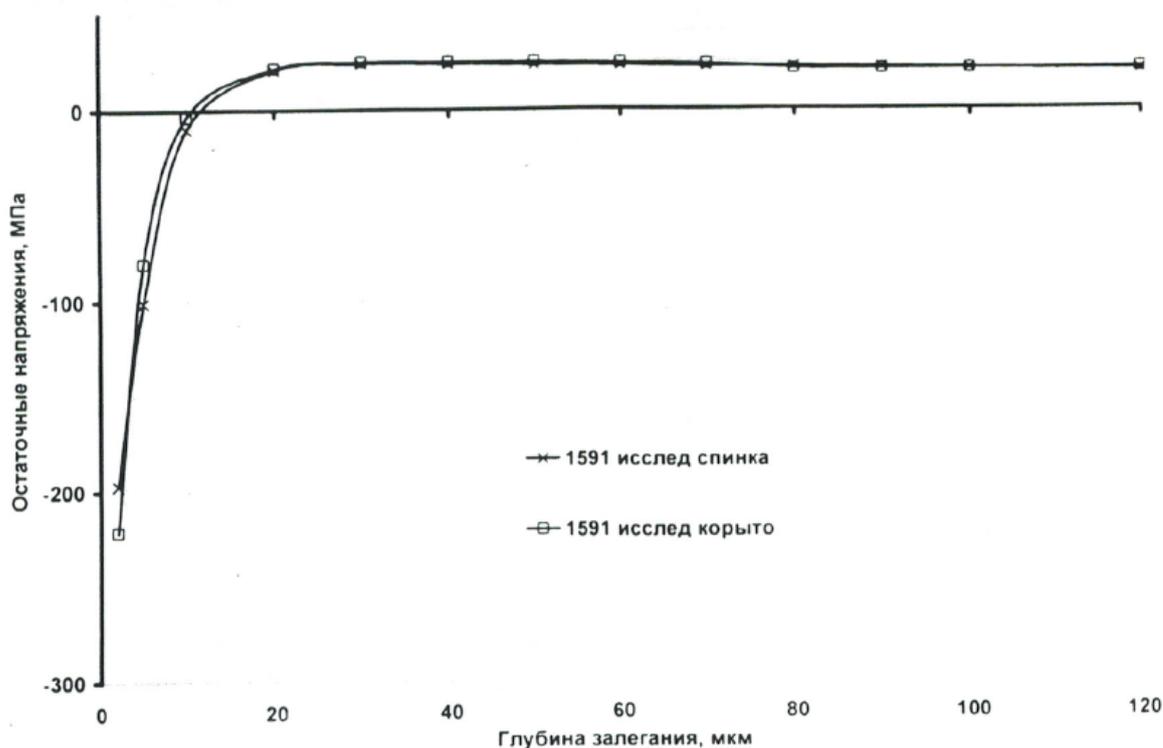


Рисунок 48 Усредненные эпюры остаточных напряжений для спинки.

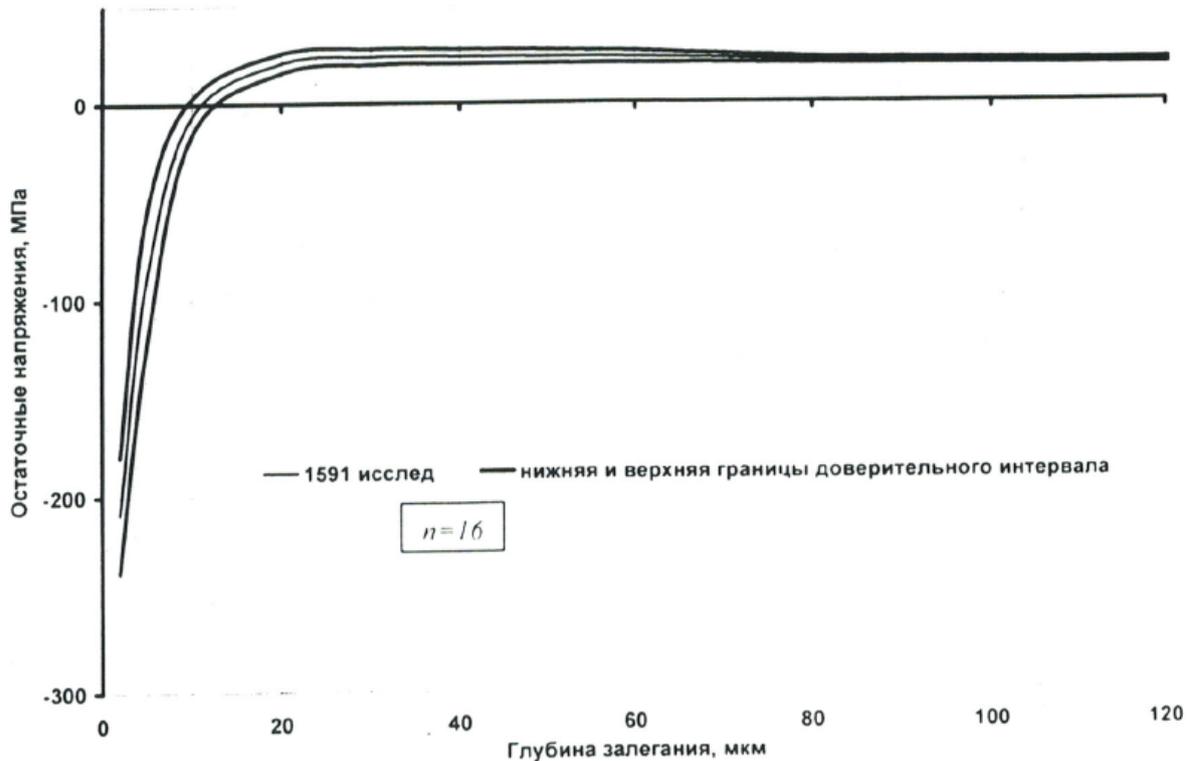


Рисунок 49 Усредненные эпюры остаточных напряжений для спинки.

На рис.48 и 49 представлены усреднённые эпюры спинки и корыта обеих лопаток. Из рисунков видно, как распределение напряжений на спинке близко к распределению остаточных напряжений на корыте, что указывает на удовлетворительное качество обработки.

Количество исследованных образцов и полученных данных позволяет провести статистическую обработку (табл. 12), определить доверительный интервал остаточных напряжений и оценить результаты исследования на соответствие нормам ЦИАМ – таблица 17.

На поверхности профиля пера измерены благоприятные напряжения сжатия величиной 209 МПа, переходящие в растягивающие напряжения на глубине 12 мкм. Величина подслойных растягивающих напряжений не превышает 24 МПа. Средне квадратичное отклонение напряжений сжатия не превышает 70 МПа, напряжений растяжения - 10 МПа.

Таблица 12. Статистическая обработка результатов исследования.

Глубина, мкм	Остаточные напряжения. МПа			
	спинка	корыто	среднее	Sx
2	-197	-221	-209	61
5	-101	-80	-90	70
10	-10	-3	-7	19
20	20	21	21	10
30	23	24	24	8
40	23	24	24	7
50	23	24	23	7
60	22	24	23	6
70	22	23	22	5
80	22	21	21	4
90	21	21	21	3
100	21	20	21	3
120	20	21	20	3

Лопатка компрессора 1 ступени. Для исследования представлены рабочие лопатки КНД 1 ступени, изготовленные методом скоростного фрезерования в количестве 3 шт.

Лопатки изготовлены по технологии фрезерования профиля пера на о.ц. Willemin-Macodel W-518ТВ.

Режимы обработки: $N=3000$ об/мин (частота вращения шпинделя),
 $F = 1500$ мм/мин (минутная подача),
шаг на строку 0,4 мм.

Материал лопаток – ВТЗ-1.

Обработка результатов исследований проводилась аналогичными методами что и для лопаток ВНА.

На рис. 50 представлены усреднённые эпюры спинки и корыта трёх лопаток. Из рисунка видно, как распределение напряжений на спинке близко к распределению остаточных напряжений на корыте, что указывает на удовлетворительное качество обработки.

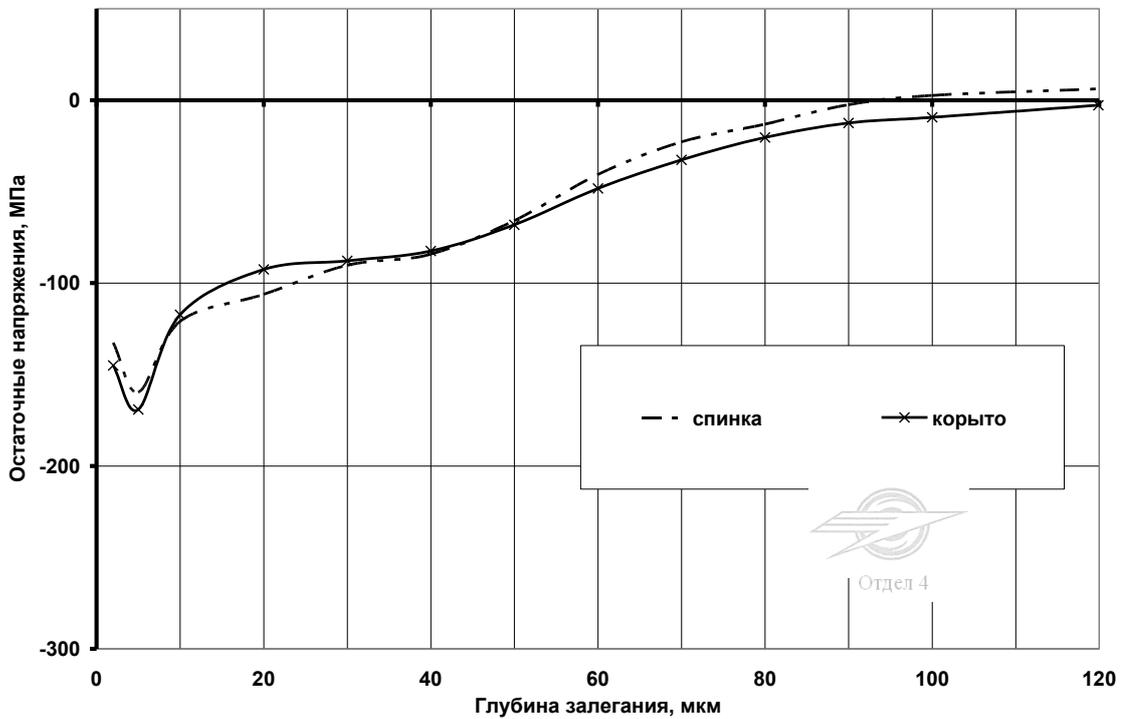


Рисунок 50 Усредненные эпюры остаточных напряжений.

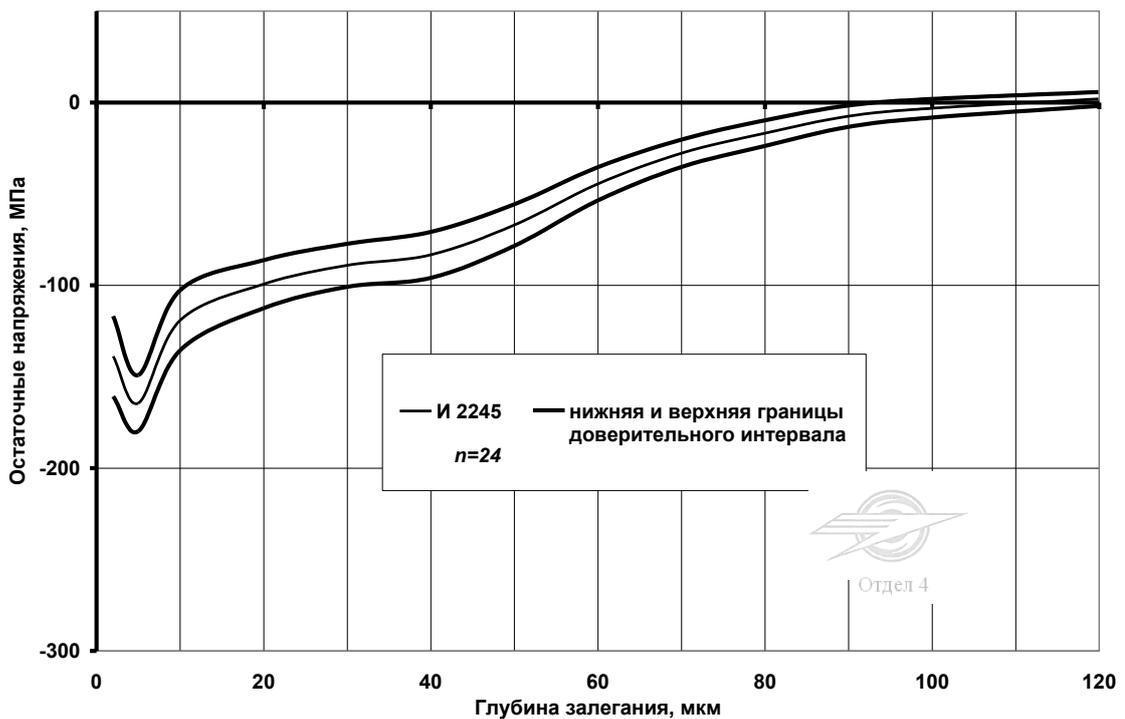


Рисунок 51 Доверительный интервал остаточных напряжений.

Количество исследованных образцов (12 шт.) и полученных данных ($n=24$) позволяет провести статистическую обработку (табл.3), определить доверительный интервал остаточных напряжений (рис. 51) и оценить результаты исследования (табл. 13) на соответствие нормам ЦИАМ (таблица 17).

Среднеквадратическое отклонение напряжений сжатия не превышает 55 (норма до 80) МПа, напряжений растяжения – 10 (норма до 25) МПа.

Таблица 13 Статистическая обработка результатов исследования

Глубина, мкм	Остаточные напряжения, МПа			
	спинка	корыто	среднее	Sx
2	-133	-145	-139	55
5	-160	-169	-164	38
10	-121	-117	-119	41
20	-106	-93	-99	33
30	-90	-88	-89	30
40	-84	-82	-83	31
50	-66	-68	-67	28
60	-41	-48	-44	23
70	-23	-33	-28	19
80	-13	-20	-17	18
90	-3	-13	-8	15
100	3	-9	-3	13
120	6	-3	2	10

4.5.1.3 Исследование образцов рабочих лопаток компрессора, полученных методом вальцевания.

Лопатки 6-ой ступени компрессора. Для исследования представлены лопатки р.к. №6 из сплава ВТ8 М1 в количестве 4-х штук. Профиль пера выполнен холодным вальцеванием с финишной обработкой виброглянцевание.

Обработка результатов исследований проводилась аналогичными методами что и для лопаток ВНА.

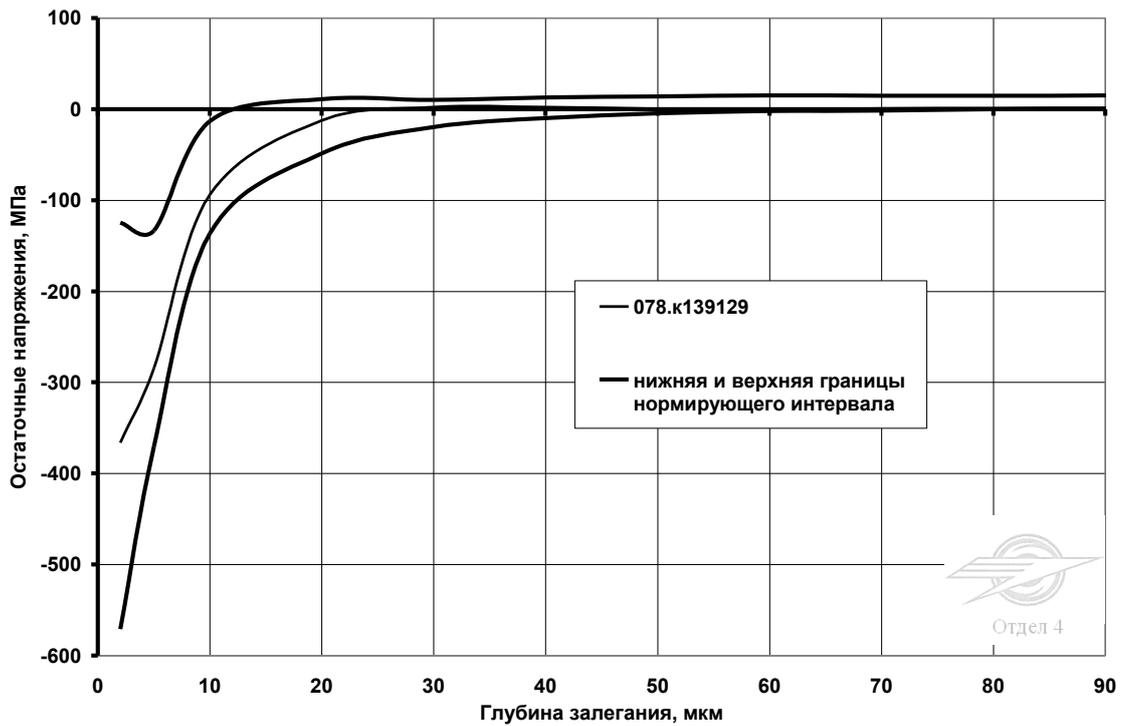


Рисунок 52 Доверительный интервал остаточных напряжений.

На поверхности профиля пера измерены напряжения сжатия величиной 366 МПа, переходящие в растягивающие напряжения на глубине 23 мкм. Величина максимальных растягивающих напряжений 10 МПа.

Таблица 14 Статистическая обработка результатов исследования

Глубина	И 6460 078к139129_ среднее	границы нормирующего интервала	
		нижняя	верхняя
2	-366	-571	-125
5	-284	-370	-133
10	-94	-137	-13
20	-13	-49	11
30	2	-20	10
40	2	-10	13
50	1	-4	14
60	-3	-2	15
70	-2	0	15
80	-1	0	15
90	1	1	15

Лопатки 2 и 3 ступени компрессора. Для исследования представлены лопатки из сплава ВТ8 в количестве 3-х штук каждой из ступеней. Лопатки изготовлены методом холодного вальцевания с финишной обработкой виброглянцеванием.

Обработка результатов исследований проводилась аналогичными методами что и для лопаток ВНА.

По усреднённым значениям остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопатки 2 ступени со стороны спинки присутствуют напряжения сжатия величиной -500 МПа, которые уменьшаются до нуля на глубине 20 мкм. На глубинах, превышающих 20 мкм, напряжения не превышают 6 МПа.

Результаты исследования в табличном виде приведены в таблице 15.

Таблица 15 Статистическая обработка результатов исследования

глубина	ВТ8_3_спинка	ВТ8_2_спинка	ВТ8_1_спинка	Усреднено 2 ступень
2	-515	-599	-387	-500
5	-238	-299	-197	-245
10	-66	-74	-46	-62
20	3	2	-4	0
30	3	1	4	3
40	2	-1	1	1
50	5	5	5	5
60	3	6	-7	1
70	1	11	6	6
80	7	4	-5	2
90	5	6	2	4
100	0	-1	3	1

На рис.53 представлены эпюры остаточных напряжений, исследованных образцов из лопаток 3 ступени.

По усреднённым значениям остаточных напряжений в поверхностном слое пера лопатки 3 ступени со стороны спинки присутствуют напряжения сжатия величиной -355 МПа, которые уменьшаются до нуля на глубине 28 мкм. На глубинах, превышающих 28 мкм, напряжения не превышают 13 МПа.

Таблица 16 Статистическая обработка
результатов исследования

Глубина	BT8_6_спинка	BT8_5_спинка	BT8_4_спинка	Усреднено 3 ступень
2	-375	-340	-349	-355
5	-219	-240	-222	-227
10	-98	-60	-62	-73
20	-25	-1	-6	-11
30	6	-8	9	2
40	20	-5	3	6
50	9	-13	1	-1
60	17	-6	13	8
70	-2	-5	1	-2
80	20	1	7	9
90	13	10	2	8
100	22		3	13

На рис.53 представлено сравнение усреднённых эпюр остаточных напряжений для поверхности пера лопаток 2 и 3 ступени.

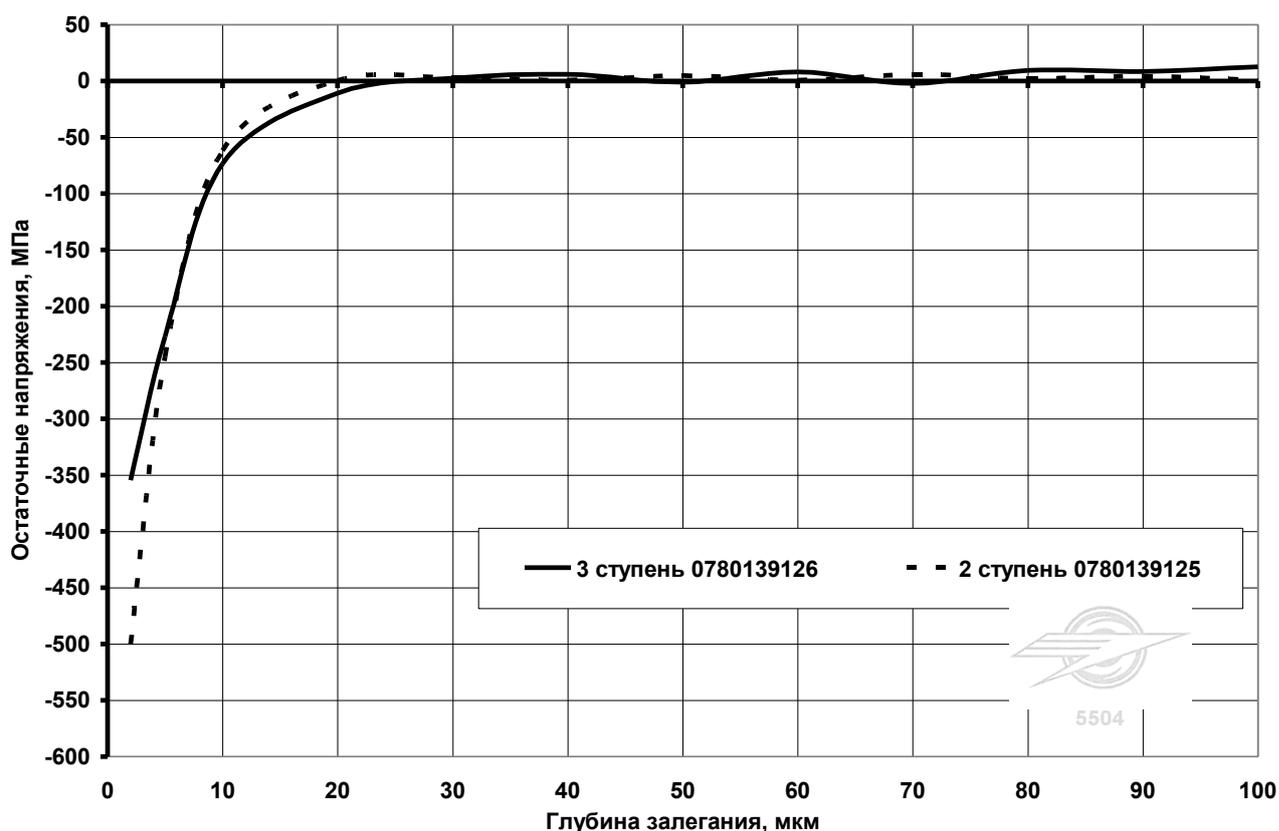


Рисунок 53 Усредненные эпюры остаточных напряжений.

Таблица 17. Проверка на соответствие нормам ЦИАМ.

Параметр	Отжиг с последующей полировкой (нормы ЦИАМ)			\bar{x} – среднее значение измеряемой величины. Sx – среднеквадратическое отклонение измеряемой величины. $[x]$ – наибольшие допустимые значения.
	\bar{x}	Sx	$[x]$	
$\sigma_{сж}^{max}$, МПа	220	90	400	
$\Delta\sigma$, мкм	30	14	60	
σ_p^{max} , МПа	35	25	90	

Согласно «Руководству по нормированию остаточных напряжений в поверхностных слоях деталей ГТД» (ЦИАМ): «...допустимые значения наименьшей глубины перехода сжимающих напряжений в растягивающие устанавливаются по фактическим данным опыта работы и результатам испытаний на прочность».

4.5.1.4 Анализ результатов исследований остаточных напряжений.

Нами были исследованы лопатки КВД изготовленные с применением различных методов формообразования пера. Кроме того, исследованы образцы различных типоразмеров.

Исследованию подвергались образцы, изготовленные из различных марок титановых сплавов. С уверенностью можно говорить, что для различных титановых сплавов можно получить благоприятные характер и величину остаточных напряжений в поверхностном слое лопаток (рис. 57).

Минимальные значения напряжений сжатия в поверхностном слое демонстрируют лопатки, обработанные методом ЭХО (рис. 54). Максимальные значения напряжений сжатия получаются при обработке методом вальцевания, причем, в отдельных случаях, могут достигаться значения превышающие рекомендованные ЦИАМ (рисунок 56). Наибольшую стабильность распределения напряжений в поверхностном слое демонстрируют лопатки, обработанные методом фрезерования (рисунок 55, 56).

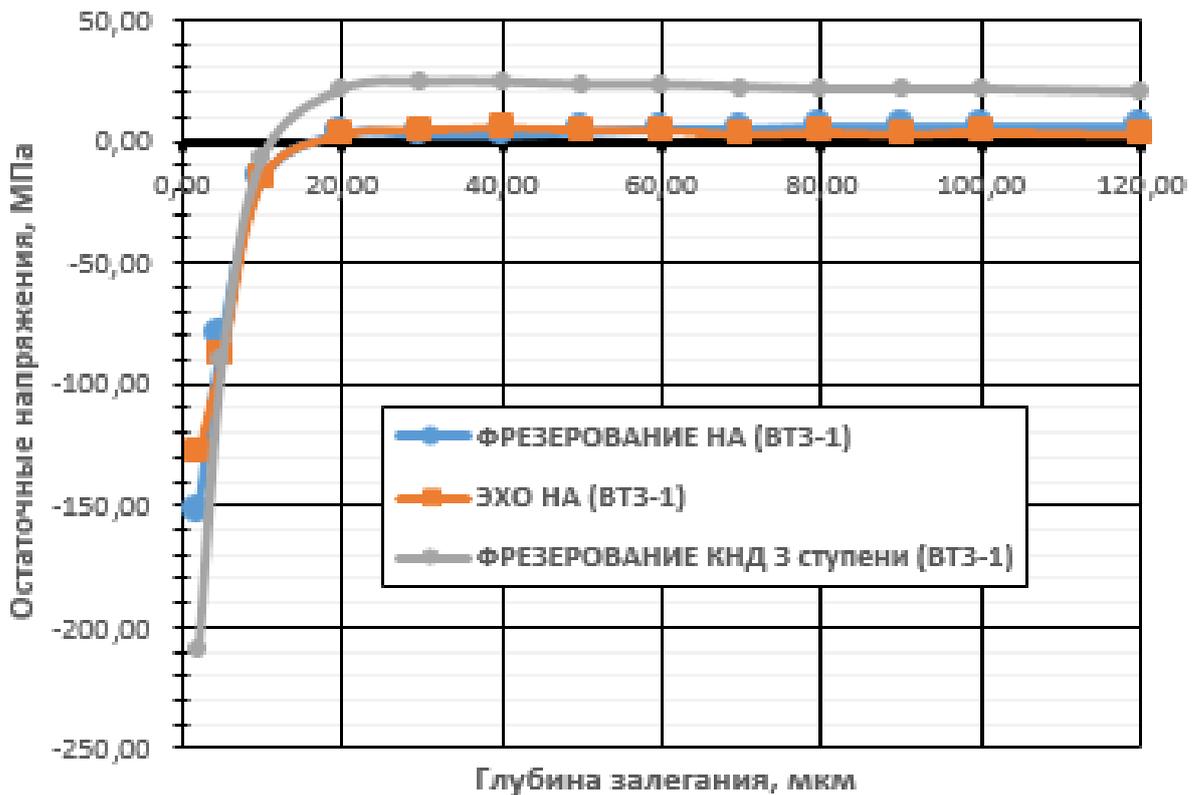


Рисунок 54. Сравнение остаточных напряжений, полученных на лопатке направляющего аппарата после ЭХО и фрезерования пера.

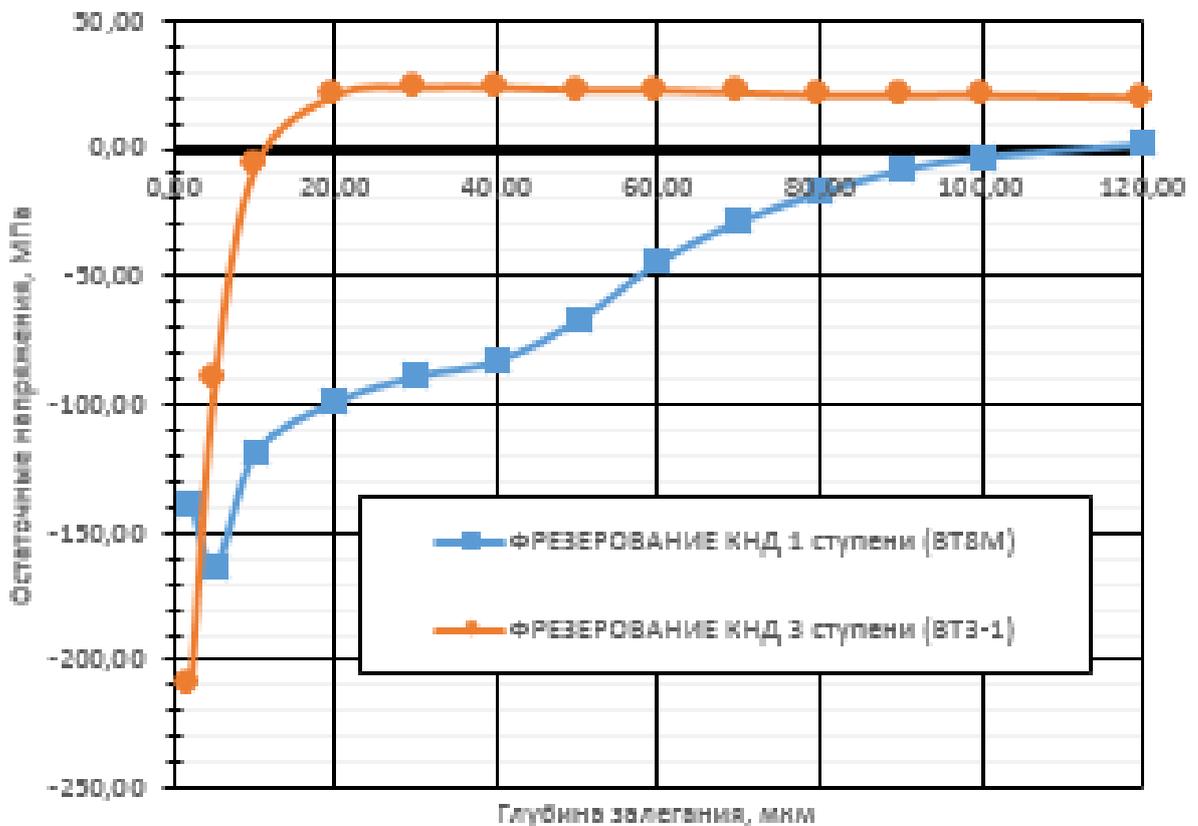


Рисунок 55. Сравнение остаточных напряжений, фрезерованных лопаток КНД и КВД разных размеров.

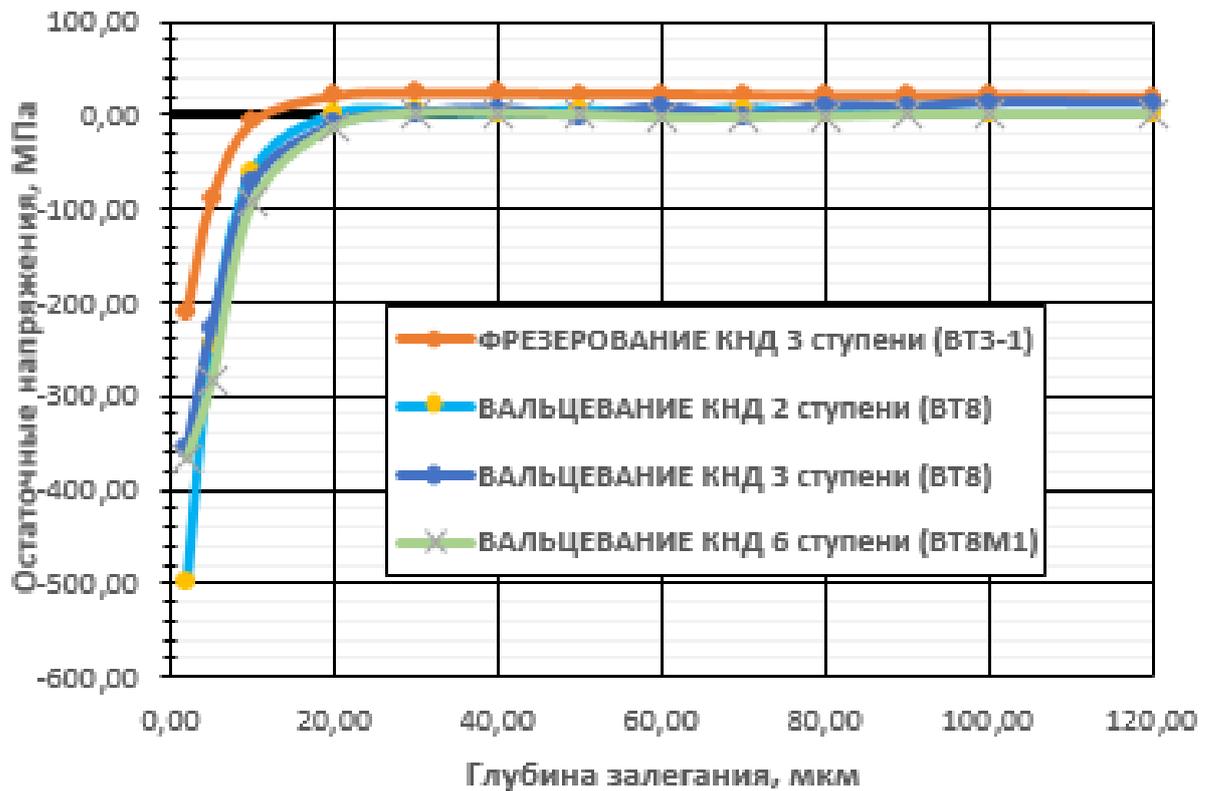


Рисунок 56. Сравнение остаточных напряжений, полученных на лопатках после фрезерования и вальцевания пера.

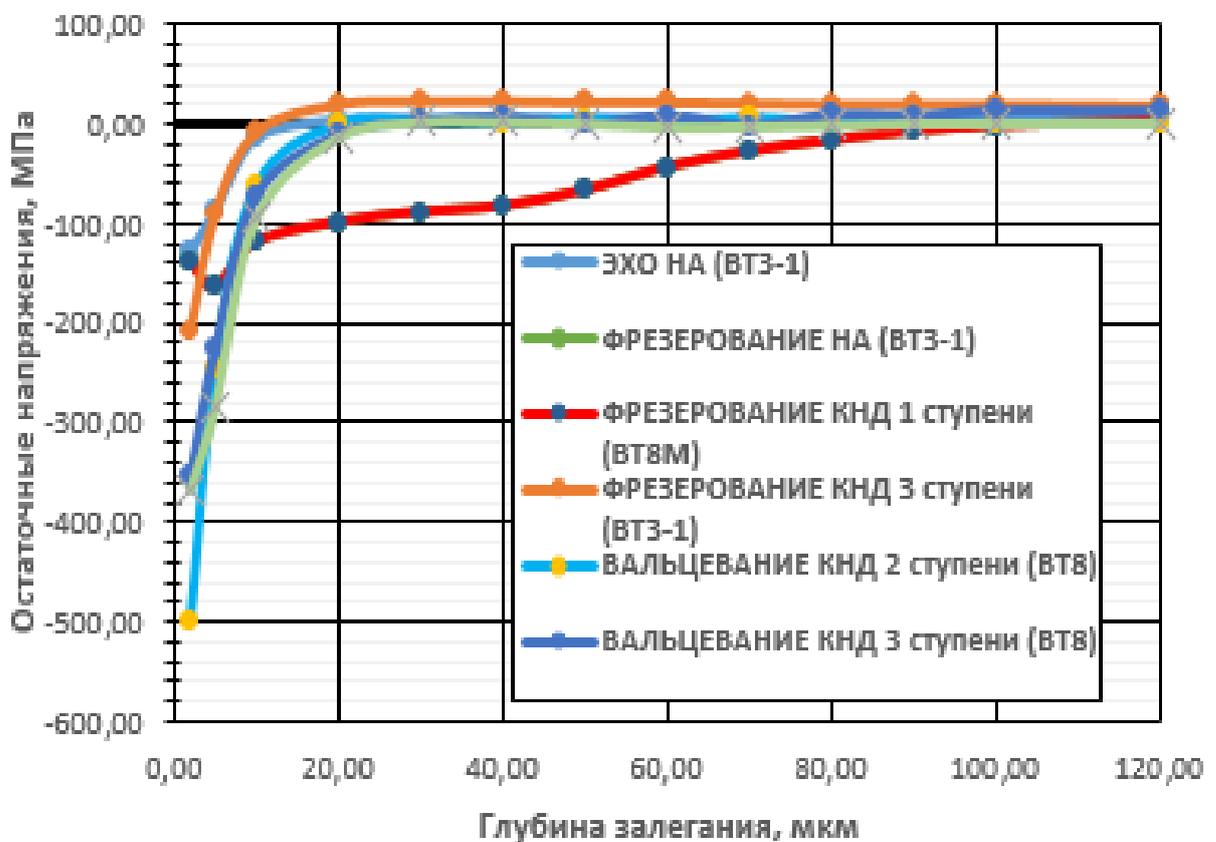


Рисунок 57. Совмещенные графики распределения остаточных напряжений.

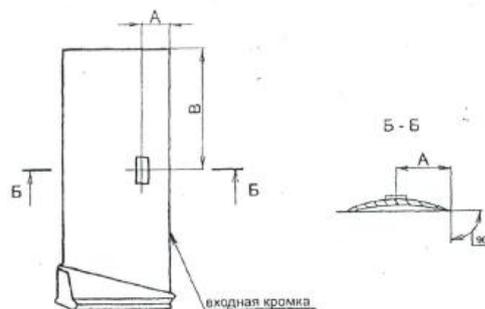
Так же необходимо отметить что свое влияние оказывают и габаритные размеры лопаток. С уменьшением размеров лопаток при вальцевании наблюдается тенденция к уменьшению напряжений сжатия без увеличения глубины их залегания. Для остальных методов обработки такой анализ провести не возможно в связи с отсутствием достаточных объемов экспериментальных данных.

4.5.2 Исследования усталостной прочности лопаток компрессора ГТД

Были проведены усталостные испытания рабочих лопаток компрессора изготовленных из упрощенной штамповки с последующим фрезерованием и полировкой.

В лабораторию механических испытаний ЦЛ были направлены рабочие лопатки компрессора, изготовленные из упрощенной штамповки. Профиль лопаток со стороны спинки и корыта изготовлен фрезерованием на станке «Макодель» с последующей полировкой на станке DC-256. Были проведены усталостные испытания лопаток с определением предела усталостной прочности. Материал лопаток ВТ8. Модуль упругости $E_{дин} = 1,29 \cdot 10^4$ кг/мм².

Предел усталостной прочности определяется согласно ОСТ 1 00870-77 по шести не разрушившимся лопаткам на базе $N = 10^8$ циклов. Начальный уровень напряжений устанавливался $\sigma_a = 52$ кг/мм². Шаг изменения напряжений при разрушении образца составляла $\Delta\sigma_a = - 3$ кг/мм². Лопатки были препарированы тензоресисторами 5П1- 3-100-Б-12. Схема препарирования указана на рис. 58.



Степень	A	B	База тензоресисторов
1	11	49	5
2	10	39	5
3	8	30	5

Рисунок 58. Схема препарирования лопаток.

Испытания проводились на электродинамическом вибростенде с комплектом измерительной аппаратуры. Предел выносливости лопаток, обработанных методом фрезерования – таблица 18 Определение предела выносливости рабочих лопаток 5-ой ступени компрессора профиль пера которых обработан методом вальцевания – таблицы 19.

Таблица 18 Результаты усталостных испытаний

Кз п/п	№ лопаток	σ_a кг/мм ²	Ф. Гц	2А размах колебаний пера лопатки	Наработк а N циклов	Примечание
1	1	52	1415	4,82	0,42 *10 ⁸	Лопатка разрушилась
2	2	49	1433	4,2	0,62 *10 ⁸	Лопатка разрушилась
3	3	46	1488	4,73	10 ⁸	Лопатка выстояла
4	4	46	1438	3,83	10 ⁸	Лопатка выстояла
5	5	46	1509	4,00	10 ⁸	Лопатка выстояла
6	6	46	1433	3,98	0,98*10 ⁸	Лопатка разрушилась
7	7	43	1389	3.71	10 ⁸	Лопатка выстояла
8	8	43	1468	3,80	10 ⁸	Лопатка выстояла
9	9	43	1579	3,78	10 ⁸	Лопатка выстояла
10	10	43	1428	3.91	10 ⁸	Лопатка выстояла
11	11	43	1489	3,80	10 ⁸	Лопатка выстояла
12	12	43	1446	3,90	10 ⁸	Лопатка выстояла

Таблица 19 Результаты усталостных испытаний

Кз п/п	№ лопаток	σ_a кг/мм ²	Ф. Гц	2А размах колебаний пера лопатки	Наработк а N циклов	Примечание
1	1	55	1410	4,55	10 ⁵	Лопатка разрушилась
2	2	52	1434	4,51	11,19*10 ⁶	Лопатка разрушилась
3	3	49	1401	4,05	69,8*10 ⁶	Лопатка разрушилась
4	4	46	1455	4,01	10 ⁸	Лопатка выстояла
5	5	46	1479	3,77	10 ⁸	Лопатка выстояла

6	6	46	1453	4,02	10^8	Лопатка выстояла
7	7	46	1460	4,04	10^8	Лопатка выстояла
8	8	46	1452	4,14	10^8	Лопатка выстояла
9	9	46	1453	3,89	10^8	Лопатка выстояла

Обработка результатов испытаний проводилась графическим способом в соответствии с ГОСТ РВ 2840-001-2008 Приложение Г и вероятностно-статистической оценкой предела выносливости в соответствии с ГОСТ РВ 2840-001-2008 Приложение И. Результаты обработки представлены на рисунке 59.

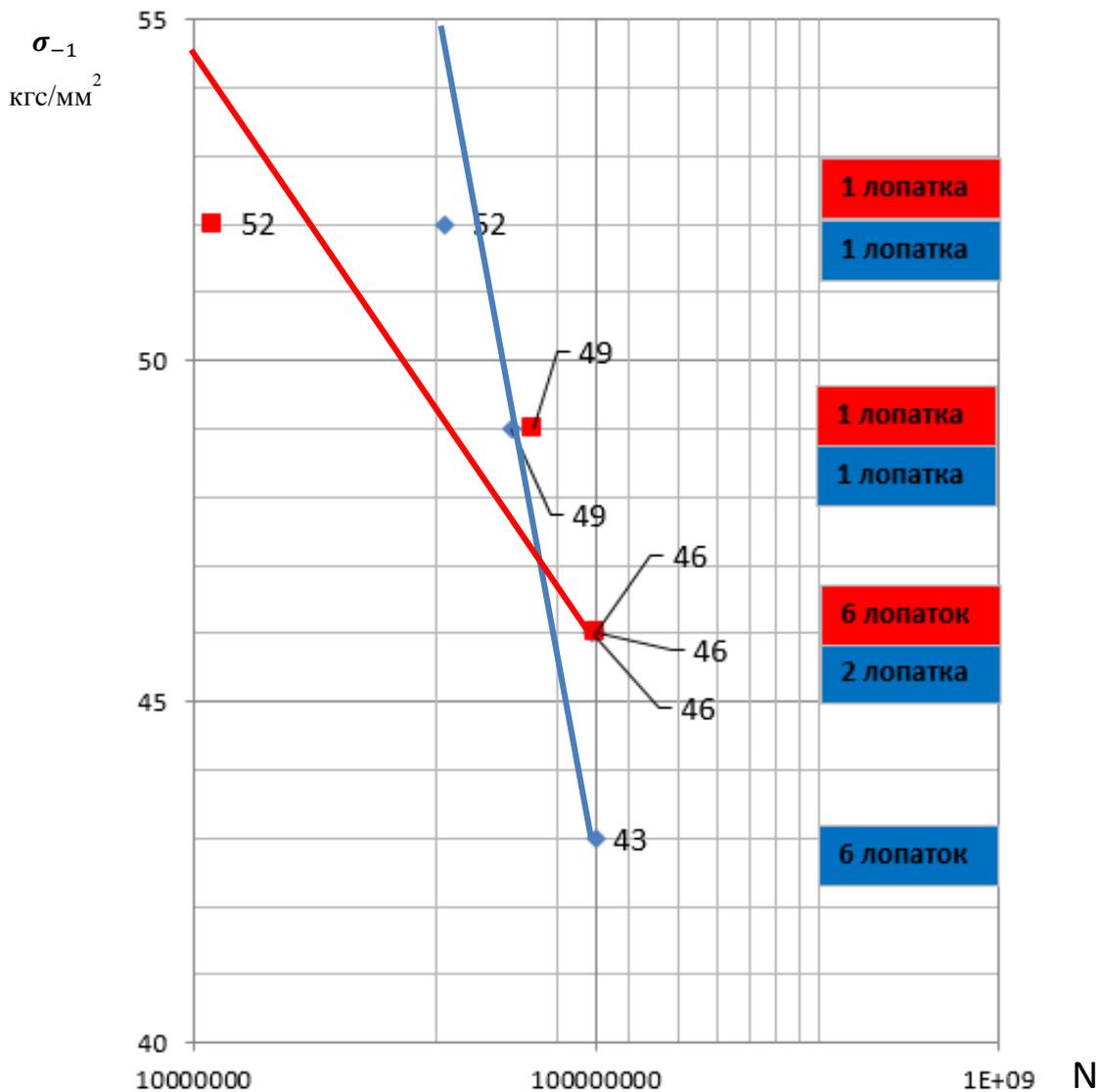


Рисунок 59. Результаты обработки данных исследований на предел выносливости.

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

Из данных полученных при исследовании остаточных напряжений в поверхностном слое лопаток компрессора ГТД выполненных из титановых сплавов, а также исследования лопаток на усталостную прочность, можно сделать следующие выводы:

1. Лопатки, выполненные по технологии фрезерования и лопатки, выполненные методом холодного вальцевания, имеют аналогичные прочностные характеристики.
2. Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое позволяет говорить об удовлетворительном качестве поверхностного слоя лопаток ГТД.
3. При существующих объемах выпуска лопаток компрессоров ГТД можно рассматривать фрезерование лопаток на станках с ЧПУ как более экономически целесообразную для лопаточного производства, особенно при разработке новых изделий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных в ходе выполнения работы исследований можно сделать следующие 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. На основании 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 ее 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 были реализованы технологические процессы изготовления лопаток КВД двигателя ВК-2500. Были предложены два технологических процесса, которые должны обеспечить схожие технологические 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:
 - а. Проведенные исследования усталостной прочности лопаток компрессора ГТД показали, что предел усталостной прочности исследуемых лопаток, выполненных методом фрезерования из упрощенной штамповки составляет не менее $\sigma_a=43$ кг/мм². Для аналогичных лопаток, изготовленных методом холодного вальцевания предел усталостной прочности лежит в диапазоне от 50 до 40 кг/мм².
 - б. 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. Средне квадратичное отклонение напряжений сжатия не превышает 70 МПа, напряжений растяжения - 10 МПа.

- с. 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, снизить стоимость конечного изделия. Указанные эффекты 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.

Список использованной литературы

1. Основы конструирования, производства и эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок в системе CALS технологий [Текст]: в 3х кн./ Н.Н. Сиротин, А.С. Новиков, А.Г. Пайкин, Е.Ю. Марчуков, А.Н. Сиротин, А.Б. Агульник, В.Г. Нестеренко – М.: Наука 2011–2012. – 2134 с.
2. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей [Текст]: аналитический обзор / В.А. Скибин и др. под ред. В.А. Скибина, В.И. Солониной/ М.: ЦИАМ – 2004. – 424 с.
3. Иноземцев, А.А. Газотурбинные двигатели [Текст] / А.А. Иноземцев, В.Л. Сандрацкий / Пермь: Авиадвигатель – 2007. – 1204 с.
4. ОСТ 1 02639-87. Лопатки авиационных осевых компрессоров и турбин, профили, решетки профилей. Термины, обозначения, определения [Текст]. – Введ. 1989-01-01. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1988. - 35с.
5. ОСТ 1 02571-86. Лопатки компрессоров и турбин. Предельные отклонения формы и расположения пера [Текст]. – Введ. 1987-01-01. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов, 1986. 36с.
6. Крымов, В. В., Елисеев Ю. С., Зудин К. И. Производство лопаток газотурбинных двигателей [Текст] / В. В. Крымов, Ю. С. Елисеев, К. И. Зудин. – М.: Машиностроение, 2002. – 376 с.
7. Основы технологии производства газотурбинных двигателей: Учебник для вузов по специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки» [Текст] / А. М. Сулима, А. А. Носков, Г. З. Серебренников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1996. – 480 с.
8. Ионов, А.В. Современные подходы к технологии изготовления лопаток плоской решетки с ТЛЖТ-рельефом поверхности для проведения экспериментальных исследований [Текст]/ Л.Л. Картовицкий, Е.Ю. Марчуков, В.В. Терентьев, А.А. Яковлев // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань, 2011. - №6 – с. 172-176.

9. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей [Текст] / В. А. Полетаев. - М.: Машиностроение, 2006. - 256 с.
10. Елисеев, Ю.С. и др. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей [Текст] / Елисеев Ю. С., Крымов В. В., Митрофанов А. А., Саушкин Б. П.; Под ред. Саушкина Б. П. – М.: Дрофа, 2002, – 655 с.
11. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин [Текст]/ А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин, М. Машиностроение, 1988. - 239 с.
12. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик ГТД. Монография [Текст]/ Богуслаев В.А., Муравченко Ф.М., Жеманюк П.Д., и др. Запорожье.: ОАО «Мотор Сич» - 2003. - 396с.
13. Орлов А.А. Повышение качества обработки профиля пера лопаток современных газотурбинных двигателей [Текст] / А.А. Орлов, Д.В. Щекотуров, В.В. Маношкин//Сборник работ международного межотраслевого молодежного научно-технического форума «Молодежь и будущее авиации и космонавтики». – Москва: МАИ, 2013. – С. 123-126.
14. Нехорошев, М.В. Автоматизация проектирования технологии электрохимической обработки пера лопаток ГТД на основе компьютерного моделирования процесса формообразования [Текст] / М.В. Нехорошев, Н.Д. Проничев Г.В. Смирнов 2013, Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 15, №6(4), - 2013. - С.897-900
15. Павлинич С.П. Перспективы применения импульсной электрохимической обработки в производстве деталей газотурбинных двигателей [Текст] // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета Т. 11, № 2. - 2008. - С. 105-115.
16. Галиев, В.Э. О проблемах и перспективах изготовления прецизионных компрессорных лопаток [Электронный ресурс] / Галиев В.Э., Фаткуллина Д.З., Таминдаров Д.Р.//Электронный научно-технический журнал «Наука и образование» - 2014г. URL:<http://technomag.bmstu.ru/doc/705085.html> (дата обращения 20.09.2014).

17. Кривошеев, И.А. Опыт разработки и внедрения компонентов информационной поддержки проектирования, доводки и эксплуатации ГТД и ГТУ [Текст] / И.А. Кривошеев / Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 14, №4(2). – 2012. - С. 428-436
18. Норенков, И. П. Основы автоматизированного проектирования [Текст]/ Норенков, И. П. // Учеб. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. - 430 с.
19. Кривошеев, И.А. Общая структура автоматизированной разработки авиационных двигателей и энергоустановок с использованием MetaСАПР/Framework, имитационного моделирования, CAD/CAM/CAE/PDF и систем поддержки принятия решений [Текст]/ Кривошеев, И.А.// М: Машиностроение, 2009. - 271 с.
20. Особенности жизненного цикла ГТД [Электронный ресурс] / С.В.Андреев, А.Б.Белов, В.А.Кабаков, И.В. Сафонов/ Электронная версия журнала «Двигатель». URL: <http://engine.aviaport.ru/issues/56/page12.html> (дата обращения 18.09.2014).
21. Р 50.1.028–2001. Методология функционального моделирования. Рекомендации по стандартизации [Текст] / Введ. 2002-07-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. 54 с.
22. Кривошеев, И.А. Автоматизация системного проектирования авиационных двигателей [Текст]: дис. ... док. тех. наук: 05.07.05: Уфа – 2000г. - 485 с. ил. 71 06-5/492
23. ГОСТ 3.1109-82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий [Текст]. – Введ. 1983-01-01. – М.:Стандартинформ, 2012 – 15 с.
24. ГОСТ 14.004-83. Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий [Текст]. – Введ. 1983-07-01 - М.: ИПК Издательство стандартов, 2003 – 8 с.

25. Губич Л. В. Внедрение на промышленных предприятиях информационных технологий поддержки жизненного цикла продукции [Текст] / Л. В. Губич М.Я. Ковалев, Н.И. Паткеви / Минск: Беларуская Навука – 2013г. – 190с.
26. Автоматизация технологической подготовки производства на ОАО «Мотор Сич» [Электронный ресурс] / Электронная версия журнала Журнал «САПР и графика» URL:<http://www.sapr.ru/article.aspx?id=20539&iid=938> (дата обращения 18.09.2014)
27. Технологическое обеспечение проектирования и производства газотурбинных двигателей [Текст] / под ред. Б.Н. Леонова и А.С. Новикова // Рыбинск: ОАО Рыбинский дом печати – 2000 – 408с.
28. Кривошеев И.А., Сапожников А.Ю., Карпов А.В. Применение CAD-систем для автоматизации компоновки авиационных газотурбинных двигателей/ Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2002): тезисы межд.конф. М.: Институт проблем управления РАН. – 2002. С.73-74.
29. Кривошеев И.А., Воронков А.П., Карпов А.В. Использование CAD/CAM и PDM-технологии при проектировании и доводке авиационных ГТД [Электронный ресурс] // Материалы I Международной конференции и выставки «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта. CAD/CAM/PDM-2001». - Москва: ИПУ РАН. – 2001, URL:<http://lab18.ipu.rssi.ru/labconf/article.asp?num52> (дата обращения 01.08.2013)
30. Технология производства авиационных двигателей: учебник для вузов [Текст] / Богуслаев В. А., Качан А. Я., Долматов А. И. [и др.]/общ. ред. Богуслаев В. А. - 2-е изд., доп. - Запорожье: Мотор Сич, 2007. Ч. 2 : Основы проектирования технологических процессов изготовления деталей авиационных двигателей и технологическая подготовка производства. - 2007. - 556 с.
31. Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей:

- Монография [Текст] / А.В. Богуслаев, Ал.А. Олейник, Ан.А. Олейник, Д.В. Павленко, С.А. Субботин; Под ред. Д.В. Павленко, С.А. Субботина. - Запорожье: ОАО "Мотор Сич", 2009. - 468 с.
32. Братухин, А.Г. Стратегия, концепция, принципы CALS [Текст] / Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение // А.Г. Братухин, В.Г. Дмитриев; гл. ред. А.Г. Братухин. - М.: ОАО «НИЦАСК», 2008. - 608 с.
33. Lee, S.G. Product lifecycle management in aviation maintenance, repair and overhaul [Текст] / S.G. Lee, Y.-S. Маа, G.L. Thimm A, J. Verstraeten Computers in Industry 59 (2008) 296–303
34. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. [Текст]. – Введ. 1979-07-01 - М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2009 – 22 с.
35. Прохоров, Ю.К. Управление качеством: Учебное пособие [Текст] / Ю.К. Прохоров – СПб: СПбГУИТМО, 2007. – 144 с.
36. Елисеев, Ю.С. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей [Текст] / Елисеев Ю.С., Крымов В.В., К.А. Малиновский, В.Г. Попов // М.: Высшая школа – 2002 – 370с.
37. Новиков, А.С. Контроль и диагностика технического состояния газотурбинных двигателей [Текст] / А.С. Новиков, А.Г. Пайкин, Н.Н. Сиротин – М.: Наука, 2007. – 470 с.
38. Чичков, Б.А. рабочие лопатки авиационных ГТД. Часть 1. Эксплуатационная повреждаемость рабочих лопаток [Электронный ресурс] / Б.А. Чичков / URL:<http://storage.mstuca.ru/handle/123456789/4353> (Дата обращения 01.07.2014)
39. Петухов, А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД [Текст] / А.Н. Петухов / М.:Машиностроение, 1993 - 229 с.
40. Петухов, А.Н. Роль поверхностного слоя в формировании несущей способности и ресурса основных деталей ГТД И ЭУ [Текст] / А.Н. Петухов / Авиационно-космическая техника и технология. 2009 - №9 (66) – С. 68-72

41. 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
42. Сахнюк, Н.В. Влияние параметров качества поверхностного слоя на выносимость лопаток компрессоров ГТД нового поколения [Текст] / Н.В. Сахнюк, / Вестник СевГТУ. - Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2011.- Вып. 117: Машиноприборостроение и транспорт.- С.153-156
43. Burnishing, P.S. Damage Tolerance Improvement of Ti-6-4 Fan Blades with Low Plasticity Burnishing [Текст] / P.S. Prevéy D.J. Hornbach J.T. Cammett R. // Ravindranath 6th Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conference – Sept. 16-19,2002 9 p.
44. Братухин А.Г Стратегия, концепция, принципы CALS [Текст] // Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение / А.Г. Братухин, В.Г. Дмитриев; гл. ред. А.Г. Братухин. - М.: ОАО «НИЦАСК», 2008. - С. 15-26.
45. Комплекс решений АСКОН для машиностроения — фундамент конкурентоспособности бизнеса [Электронный ресурс] / URL:<http://machinery.ascon.ru/solutions/> (дата обращения 25.07.2014)
46. СПРУТ-ТП - автоматизированное проектирование и нормирование технологических процессов [Электронный ресурс] / URL:<http://www.sprut.ru/products-and-solutions/products/sprut-tp/?tab=97> (дата обращения 25.07.2014)
47. Tung, C. Tool Path Generation and Manufacturing Process for Blades of a Compressor [Текст] / C. Tung and P.-L. Tso / RotorWorld Academy of Science, Engineering and Technology 76 – 2011. – С.172-177
48. Xiong, Ying. The development and manufacture of fixed ultrasonic inspection reference reflectors and transducers for compressor blade dovetails [Электронный ресурс] / Ying Xiong, Dexiu Dong, Jiangang Duan / 2011 CANSMAST CINDE IZFP/ URL:<http://www.ndt.net/search/abstract.php3?AbsID=11479> (дата обращения 01.06.2014)

49. Богуслаев, В.А. Использование технологической наследственности при изготовлении деталей ГТД из титановых сплавов [Текст] / Богуслаев В.А., Долматов А.И., Жеманюк П.Д. и др. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2001. – 120 с
50. Кузнецов Н.Д. Технологические методы повышения надежности деталей машин / Н.Д. Кузнецов, В.И. Цейтлин, В.И. Волков [Текст] / М.: Машиностроение. 1993. - 304 с.
51. Петухов А.Н. Технологическая наследственность и конструкционная прочность деталей ГТД и ЭУ [Текст] // Конверсия в машиностроении. - 2004. - № 1. - С. 69-71.
52. Анализ напряженно-деформированного состояния деталей авиационных ГТД с учетом возможных технологических отклонений [Текст] / Ф.М. Муравченко, А.В. Шереметьев, А.В. Петров // Вестн. двигателестроения. - 2005. - N 1. - С. 23-28
53. Ионов, А.В. CALS-технологии в проектировании, технологической подготовке производства и производстве деталей турбокомпрессоров [Текст] / А.В. Ионов, В.В. Терентьев / Тезисы докладов. 10-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2011». СПб.: Мастерская печати - 2011. – С. 125-126
54. Marcus, S. A master-model approach to whole jet engine analysis and design optimization [Электронный ресурс] / Marcus Sandberg, Michael Kokkolaras, Jan-Olov Aidanpää, Ola Isaksson, Tobias Larsson // 8th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization / URL:http://www.academia.edu/625627/A_master-model_approach_to_whole_jet_engine_analysis_and_design_optimization (дата обращения 12.06.2014)
55. 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)

56. Ионов, А. В. Информационная поддержка разработки деталей турбокомпрессоров [Текст] / А. В. Ионов // Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева, Выпуск №2 – 2012. – С. 42-45
57. Кривошеев, И.А. Опыт разработки и внедрения компонентов информационной поддержки проектирования, доводки и эксплуатации ГТД и ГТУ / И.А. Кривошеев / Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 14, №4(2) - 2012. - С. 428-436
58. Абрамова, И.Г. Эффективность внедрения PDM – систем на машиностроительных предприятиях [Текст] / И.Г. Абрамова, Д. А. Абрамов, Р. М. Богомолов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, №3(19) - 2009. - С. 304-310
59. Абрамова, И.Г. Объектно-ориентированные модели конструкторско-технологической подготовки производства / И.Г. Абрамова / Вестник СамГУ - Естественнонаучная серия - №6(65) - 2008. – С.388-395
60. 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)
61. ГОСТ 3.1102-81. Единая система технологической документации. Стадии разработки и виды документов [Текст]. – Введ. 1982-07-01. – М.:Стандартинформ, 2006 – 8 с.
62. ГОСТ 3.1119-83. Единая система технологической документации. Общие требования к комплектности и оформлению комплектов документов на единичные технологически процессы [Текст]. – Введ. 1985-01-01. – М.:Стандартинформ, 2007 – 17 с.
63. ГОСТ 3.1121-84. Единая система технологической документации. Общие требования к комплектности и оформлению комплектов документов на типовые и групповые технологические процессы (операции) [Текст]. - Введ. 1986-01-01. – М.:Стандартинформ, 2006 – 47 с.