

На правах рукописи



ГАЙНЦЕВА Екатерина Сергеевна

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА
ЛОПАТОК ГТД НА БАЗЕ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ**

**Специальность 05.13.06 «Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами»
(в промышленности)**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО
"Уфимский государственный авиационный технический университет"
на кафедре автоматизированных систем управления

Научный руководитель

д-р техн. наук, проф.
КУЛИКОВ Геннадий Григорьевич

Официальные оппоненты

д-р техн. наук, проф.
ЗОРИКТУЕВ Вячеслав Цыденович
проф. каф. автоматизации
технологических процессов ФГБОУ ВПО
«Уфимский государственный
авиационный технический университет»

канд. техн. наук
ЧЕЧУЛИН Анатолий Юрьевич
гл. конструктор ОАО УАП «Гидравлика»

Ведущая организация

ОАО «Институт технологии
и организации производства»

Защита диссертации состоится «20» ноября 2013 г. в 10 час.
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03
при Уфимском государственном авиационном техническом университете
по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан «18» октября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, проф.



В. В. Миронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Развитие авиационного двигателестроения невозможно без непрерывного повышения тяговой мощности двигателя и, как следствие, увеличения температуры газов перед турбиной. Одним из способов повышения рабочей температуры охлаждаемой лопатки является совершенствование каналов охлаждения. Основным способ изготовления заготовок охлаждаемых лопаток – это литье по выплавляемым моделям с применением керамических стержней, оформляющих внутреннюю полость отливки. В общем случае толщина стенок пера охлаждаемых лопаток изменяется от 0,8 до 3,5 мм. Поэтому смещение или коробление стержня даже на 0,15–0,3 мм приводит к возникновению разнотолщинности пера лопатки и, как следствие, к неисправимому браку. Возникающие отклонения технологического процесса изготовления лопаток приводят к значительному браку по искажению размеров охлаждаемой лопатки (20 – 50% от всех бракованных лопаток при общем браке около 30%). Анализ литературных источников показал, что проблема искажения заданной геометрии литых охлаждаемых лопаток является актуальной, а существующие методы управления технологическим процессом получения лопатки ГТД с заданной пространственной точностью при технологической подготовке производства (ТПП) не достаточно точно и всесторонне рассмотрены и описаны математическими зависимостями. Конструктивные и технологические особенности системы стержень–отливка–оболочка недостаточно изучены и вызывают трудности при теоретических и экспериментальных исследованиях. Процесс изготовления литой лопатки определяется большим числом технологических параметров, зачастую значительно зашумленных.

При существующем уровне знаний в области лопаточного литья, на этапе ТПП требуется проведение ряда дорогих и трудоемких экспериментов. Одним из перспективных направлений повышения эффективности автоматизированных систем управления технологическим процессом является применение экспертных систем (ЭС), которые позволяют сконцентрировать основные знания и технический опыт специалистов для автоматизированного управления технологическим процессом освоения и изготовления качественных охлаждаемых лопаток. В настоящей работе рассматриваются вопросы повышения качества получаемых охлаждаемых лопаток турбин с применением ЭС в автоматизированных системах ТПП и управления технологическим процессом.

Таким образом, на этапе ТПП проблема изготовления лопаток с заданной пространственной точностью с использованием ЭС является актуальной задачей научного исследования.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время проблема управления ТПП охлаждаемых лопаток ГТД с заданной пространственной точностью исследована недостаточно полно и всесторонне. Существующие методы решения проблем качества отливки опираются на нормативные требования и опыт технолога. При достижении поставленной в рамках диссертационной работы цели исследовались работы российских и зарубежных ученых, внесших вклад

в различные аспекты: в области теории литья лопаток ГТД – Я. И. Шкленник, В. А. Озеров, Г. Ф. Баландин, В. А. Рыбкин, А. А. Ганеев, С. П. Павлинич, А. С. Челушкин, А. С. Горюхин и др.; в области методов искусственного интеллекта – А. Г. Ивахненко, Д. В. Смолин, Л. С. Болотова, С. В. Аксенов, В. В. Круглов, Р. Каллан, П. Норвиг, С. Хайкин и др.; в области теории ЭС – Э. В. Попов, Н. А. Соловьев, Б. Г. Ильясов, В. И. Васильев, Д. И. Муромцев, А. П. Частиков, Дж. Джаратано, Г. Райли и др.; в области построения баз знаний для построения АСУ – Т. А. Гаврилова, Л. Р. Черняховская, В. Ф. Хорошевский, О. О. Варламов и др.; в области автоматизированных информационных систем управления – А. В. Речкалов, Г. Г. Куликов, В. Ц. Зориктуев, М. Хаммер, Дж. Чампи и др.

Объектом исследования является автоматизация ТПП литых охлаждаемых лопаток ГТД.

Предметом исследования является разработка ЭС для автоматизированного управления ТПП литых охлаждаемых лопаток ГТД с заданной пространственной точностью.

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности ТПП литых охлаждаемых лопаток с заданной пространственной точностью на базе ЭС в условиях неполной технологической информации.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе сформулированы и решены следующие задачи:

1. Формализация технологического процесса изготовления охлаждаемой лопатки с заданной пространственной точностью с точки зрения системы стержень–отливка–оболочка, выявление ее структуры и определение взаимодействия с внешней средой.

2. Построение базы знаний изготовления литых охлаждаемых лопаток с заданной пространственной точностью, разработка метода структурирования базы знаний как ядра ЭС, формализация структурированных знаний в виде графа системы продукционных правил и рекомендаций, обеспечивающих процесс автоматизированного выдвижения рекомендаций при ТПП отливок охлаждаемых лопаток.

3. Разработка метода автоматизированного управления технологическим процессом и алгоритмов функционирования ЭС для прогнозирования и повышения пространственной точности литых охлаждаемых лопаток ГТД.

4. Разработка концептуальной модели и методов повышения пространственной точности литых охлаждаемых лопаток, алгоритмов формирования новых знаний в ЭС изготовления лопаток ГТД с заданной пространственной точностью.

5. Разработка модели ЭС управления ТПП отливок различной конфигурации из разных сплавов.

Научная новизна работы

1. Впервые предложено рассмотрение технологического процесса изготовления охлаждаемой лопатки с заданной пространственной точностью с точки зрения системы стержень–отливка–оболочка, позволяющее исследовать деформаци-

онные процессы элементов системы во взаимодействии и использовать методы системного анализа технических систем.

2. Впервые предложено применение базы знаний ЭС для автоматизированного управления ТПП литых охлаждаемых лопаток, аккумулирующей технологический опыт экспертов, отличающейся тем, что она включает математические зависимости взаимодействия элементов системы, графики, таблицы и знания, формализующие технологический опыт, структурирующие комплекс знаний в области литья охлаждаемых лопаток.

3. Предложен метод автоматизированного анализа и управления технологическим процессом изготовления охлаждаемых лопаток ГТД, включающий модель ЭС и алгоритм формирования новых знаний, отличающаяся тем, что он позволяет повышать пространственную точность охлаждаемых лопаток любой конфигурации и размеров, показывающий взаимосвязи базы данных, базы знаний, а также модулей детерминированного расчета, нейросетевого прогнозирования и метода группового учета аргументов.

4. Предложены концептуальная модель и метод повышения пространственной точности литых охлаждаемых лопаток ГТД, отличающиеся тем, что они позволяют выдвигать и рассматривать гипотезы отклонения геометрии стержня от конструктивно заданной, получать новые эффективные технологические рекомендации на основе корректируемых производственных правил для системы стержень–отливка–оболочка. Уточнена математическая модель прогиба стержня в лопатке, отличающаяся тем, что она получена на основе выдвинутых гипотез, с использованием в комплексе детерминированного метода расчета и метода группового учета аргументов, и позволяет повысить точность прогноза качества внутренней полости охлаждаемой лопатки.

5. Разработан метод автоматизированного управления качеством изготовления отливок из различных сплавов с использованием ЭС, отличающийся тем, что он может быть применен для различных по конфигурации отливок и способов их получения, с целью снижения уровня брака (предупреждения разнообразных дефектов).

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Применение ЭС при управлении технологическим процессом изготовления литых охлаждаемых лопаток позволяет сократить время подготовки производства при освоении новой продукции, за счет сокращения доли дорогих активных экспериментов, и снизить технологические потери, за счет разработки качественной технологии, основанной на выдвигаемых технологических рекомендациях.

2. Разработанная программа математического расчета и применяемый метод группового учета аргументов, позволяют автоматизировать прогнозирование величины прогиба и угла разворота керамических стержней и управлять технологическими параметрами при получении охлаждаемых лопаток.

3. Разработана база знаний, являющаяся ядром ЭС, которая позволяет в автоматизированном режиме вырабатывать рекомендации по корректировке техно-

логического процесса для повышения пространственной точности отливок охлаждаемых лопаток.

4. Предложен метод настройки упоров пресс-формы модели при ТПП, корректирующих положение стержня в пресс-форме, на основе вычисления отклонения реальной геометрии стержня, замеренной оптической системой ATOS, от его твердотельной модели.

Материалы диссертации могут быть использованы в учебном процессе при чтении лекций по дисциплине «Применение CALS – технологий в литейном производстве», а также повысить эффективность подготовки технического персонала литейных цехов.

Практическая значимость результатов подтверждена актом внедрения работы в ОАО «УМПО» и актом об использовании в учебном процессе ФГБОУ ВПО «УГАТУ».

Методы исследования. В диссертационной работе использованы методы: системного анализа ТПП, структурно-функционального анализа, объектно-ориентированного проектирования информационных систем, алгоритмизации, проектирования реляционных баз данных, группового учета аргументов, также были использованы методики экспертных оценок, а также программные средства (MS SQL Server, Delphi, NeuroSolutions, GMDH Shell, MS Excel, «Рапана»).

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель системы стержень–отливка–оболочка как объекта производства, её структура и взаимодействие с внешней средой.

2. База знаний ЭС изготовления литых охлаждаемых лопаток, включающая знания в виде математических зависимостей, таблиц, графиков и технологического опыта и формализация этих знаний в виде системы продукционных правил.

3. Метод автоматизированного управления технологическим процессом и алгоритм формирования новых знаний в ЭС, повышающие пространственную точность лопаток ГТД.

4. Концептуальная модель и алгоритмы повышения пространственной точности литых охлаждаемых лопаток ГТД, позволяющие получать новые технологические рекомендации на основе коррекции продукционных правил. Уточненная математическая модель взаимодействия элементов системы стержень–отливка–оболочка, повышающая точность прогноза пространственной точности отливок охлаждаемых лопаток.

5. Модель ЭС управления ТПП отливок различной конфигурации из разных сплавов, получаемых любыми способами литья.

Степень достоверности результатов полученных в работе подтверждается использованием апробированных научных положений и методов исследования, корректным применением математического аппарата и методов обработки данных, использованием научных результатов согласованных с теоретическими положениями. Достоверность полученных теоретических положений подтверждается экспериментальными исследованиями, обеспечивается применением современных средств оптического и механического измерения, сертифицированной и

аттестованной измерительной аппаратурой, корректной статистической обработкой данных.

Апробация результатов. Положения диссертации и результаты исследований докладывались на научно-практических конференциях: Российская НТК, имени член-корр. РАН, проф. Р.Р. Мавлютова «Мавлютовские чтения», Уфа, 2011 г.; Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения», Уфа, 2011, 2012 г.; VIII Всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых ученых, Уфа, 2013 г.

Публикации. Список публикаций по теме диссертации содержит 10 работ, в том числе 2 в рецензируемом научном журнале из списка ВАК, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных результатов, списка литературы и приложений, содержит 146 листов основного текста и 33 листа приложения, и включает 52 рисунка, 13 таблиц, 151 наименование использованной литературы.

Благодарности. Автор выражает благодарность д-ру техн. наук, проф. Павлиничу Сергею Петровичу и канд. техн. наук, доц. Горюхину Александру Сергеевичу за консультации и советы по вопросам ТПП и технологических процессов в литейном производстве.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована проблема, цель и задачи диссертационного исследования, обоснована научная новизна и практическая значимость полученных результатов работы.

В первой главе рассмотрен существующий метод математического прогнозирования пространственной точности литой охлаждаемой лопатки ГТД. Выявлены особенности стержня, формирующего внутреннюю полость лопатки, – его естественно-закрученная конструкция, особенности системы стержень–отливка–оболочка – сложное напряженно-деформированное состояние при высоких температурах. Управление технологическим процессом изготовления литой охлаждаемой лопатки ГТД с заданной пространственной точностью рассматривается с точки зрения системы стержень–отливка–оболочка. Структурированная система позволяет применять методы системного анализа для выявления причин отклонения размеров внутренней полости в результате прогиба стержня. Теоретические исследования и решение задачи деформации керамических стержней при литье охлаждаемых лопаток позволило получить зависимости прогиба и угла разворота стержней под воздействием различных технологических факторов, с использованием уравнения в виде

$$\omega = \left\{ f_0 + \Delta\alpha T \xi \frac{12e_z b^2}{\pi^2 h^2} + \alpha_{cm} \Delta T_z \xi \frac{b^2}{12\pi^2 h} + \Delta\alpha T \psi \frac{\varphi_n b^2 e_x}{\pi^2 h^2} + \alpha_{cm} \Delta T_x \psi \frac{\varphi_n a b^2}{12\pi^2 (1-\nu) h^2} \right\} \times \quad (1)$$

$$\times \frac{z(y)}{1 - \psi \frac{\lambda^2}{\pi^2} \left\{ \Delta\alpha T + \frac{[\Delta\alpha T 12e_x(1-\nu) + \alpha_{cm} \Delta T_x a]^2 2ah(1+\nu)}{[12(1-\nu)]^2 [J_{kp} \Delta\alpha T (J_x - J_z) 2(1+\nu)]} \right\}},$$

где f_0 – первоначальный прогиб стержня, мм;

$\Delta\alpha T$ – средняя разность расширения стержня и оболочки при температуре T , %;

ΔT_z – перепад температуры по толщине стержня, °C;

ΔT_x – перепад температуры по ширине (по хорде) стержня, °C;

e_x, e_z – расстояние от естественной оси стержня до оси приложения равнодействующей осевой силы, мм;

b – длина стержня, мм;

h – толщина стержня, мм;

a – ширина стержня, мм;

α_{cm} – коэффициент термического расширения материала стержня, °C⁻¹;

φ_n – угол поворота сечения при деформациях кручения, рад;

λ – гибкость стержня;

J_x, J_z – наименьший и наибольший моменты инерции поперечного сечения стержня, мм⁴;

J_{kp} – полярный момент инерции поперечного сечения стержня, мм⁴;

F – площадь поперечного сечения стержня, мм²;

ν – коэффициент Пуассона;

ξ, ψ, μ – численные коэффициенты, значения которых зависят от условий закрепления концов стержня;

$z(y)$ – функция прогиба, удовлетворяющая граничным условиям.

Проведенный анализ показал, что прогиб и угол разворота стержней зависит от таких факторов, как величина первоначального прогиба, распределение температуры по высоте стержня и формы, распределение температуры по толщине стержня, эксцентричность приложения возникающей осевой нагрузки, распределение температуры по ширине, уровень осевой нагрузки (осевой деформации) стержня. В результате рассмотрения системы стержень–отливка–оболочка и проведенного факторного анализа показано, что в условиях недостаточной формализованности технологических знаний целесообразно применение ЭС, позволяющей автоматизировано управлять ТПП литых охлаждаемых лопаток. ЭС позволит формализовать процесс управления технологией изготовления литой охлаждаемой лопатки, определить степень влияния технологических параметров на пространственную точность, выявить новые знания в области лопаточного литья и учесть не учтенные детерминированным методом факторы, повысить пространственную точность лопатки и, как следствие, снизить уровень брака по геометрии, что в конечном итоге приведет к значительному экономическому эффекту.

Во второй главе представлена модель ЭС управления ТПП литых охлаждаемых лопаток ГТД с заданной пространственной точностью и ее общая струк-

тура, выделены основные подсистемы, особое внимание уделено разработке базы знаний. Показаны основные достоинства применения ЭС.

Ядром ЭС является база знаний, которая хранит в себе информацию об аналитических зависимостях протекания процессов изготовления литых лопаток с заданной пространственной точностью, свойствах материалов и т.п. Формализация знаний позволяет управлять точностью литья охлаждаемых лопаток. База знаний имеет иерархическую структуру, в которой знания выражены в явном виде и организованы так, чтобы упростить принятие решений. Организация и накопление знаний – одна из важнейших характеристик ЭС. Семантическая структура базы знаний представлена как совокупность формул, таблиц, графиков, знаний в виде технологического опыта и описывает: расчет величины прогиба стержня (рисунок 1), расчет величины угла разворота стержня, неравномерное распределение температуры по толщине стержня, величину осевой деформации и другие параметры.

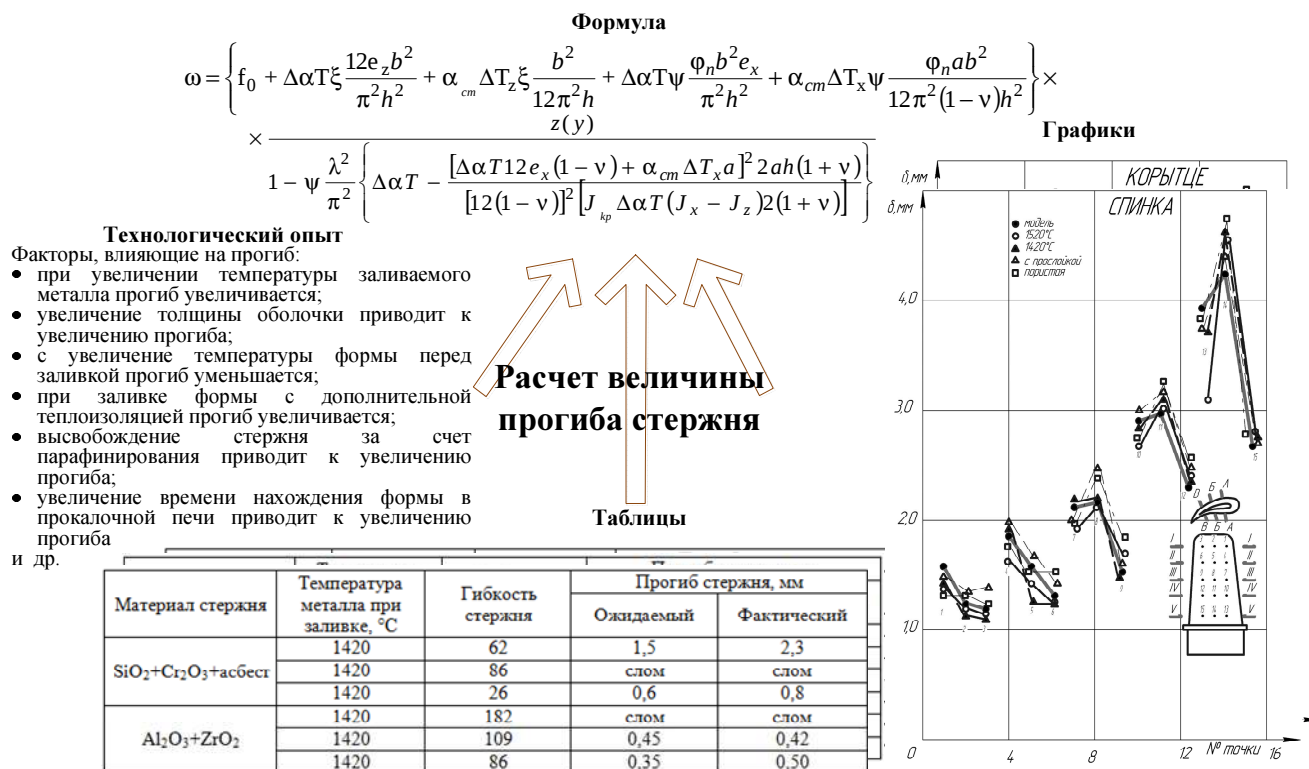


Рисунок 1 – Структура фрагмента «Расчет величины прогиба стержня» базы знаний изготовления охлаждаемых лопаток турбин

Разработаны концептуальная и функциональные модели поля знаний, позволяющие перейти к формализации в виде продукционной модели представления знаний, наиболее удобной модели извлечения и представления знаний в такой трудноформализуемой области как литейное производство. Разработана система продукционных правил (рисунок 2, таблица 1), позволяющая управлять технологическим процессом изготовления литой охлаждаемой лопатки турбины с заданной пространственной точностью, на основе получаемых технологическими рекомендациями.

Для представления и обработки нечетких знаний в ЭС используется подход с использованием коэффициентов уверенности, которые являются оценкой степени доверия к решению, выдаваемому ЭС. Такая оценка проводится по схеме Шортлиффа.

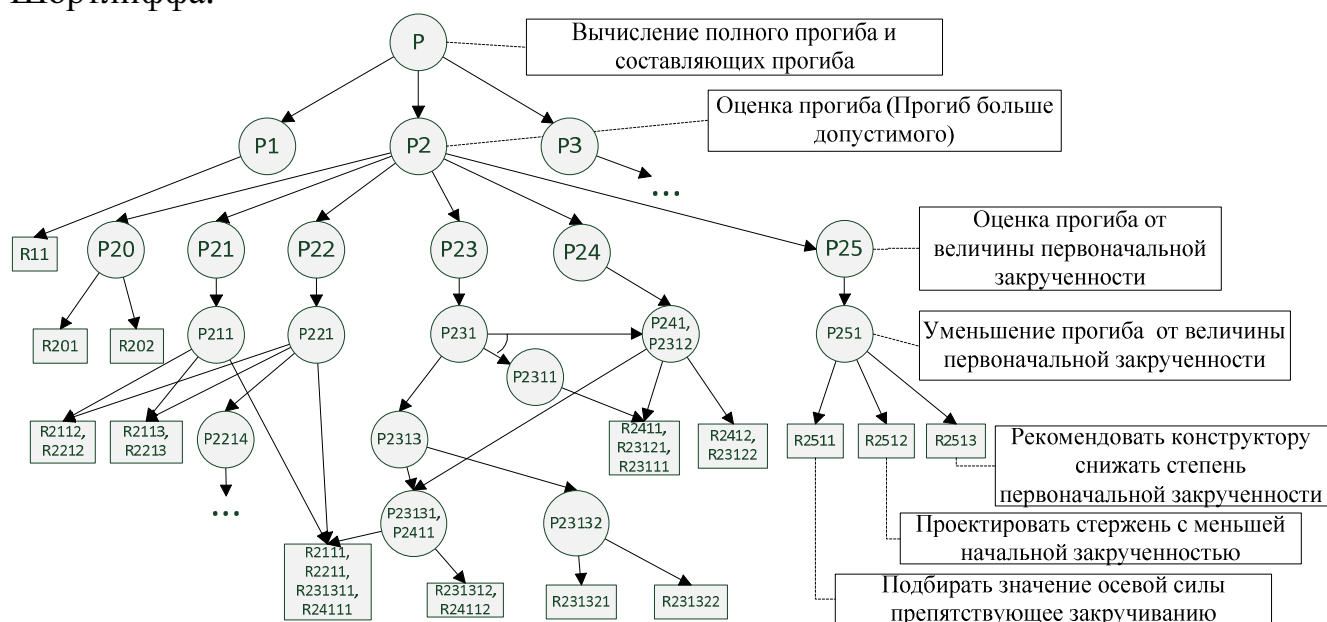


Рисунок 2 – Фрагмент графа системы продукционных правил и рекомендаций для интеллектуальной поддержки принятия решений (*P* – правила, *R* – рекомендации)

Таблица 1 – Продукционные правила (фрагмент)

Обозн.	Имя правила	Содержание правила	
		Условие «Если»	Действие «Тогда»
<i>P</i>	Прогиб	Необходимо узнать значение прогиба стержня	Рассчитать полный прогиб (<i>P</i>) и Рассчитать прогиб от неравномерного прогрева по толщине (<i>P21</i>) и Рассчитать прогиб от неравномерного прогрева по ширине (<i>P22</i>) и Рассчитать прогиб от эксцентричного приложения возникающей осевой нагрузки (<i>P23</i>) и Рассчитать уровень осевой нагрузки (<i>P24</i>) и Рассчитать прогиб от величины первоначальной закрученности (<i>P25</i>)
...			
<i>P23132</i>	Термич. расшир. оболочки	Термич. расшир. оболочки больше термич. расшир. стержня	Подбирать материал оболочки с меньшим коэффициентом термического расширения (<i>R231321</i>) и/или Подбирать материал стержня с большим коэффициентом термического расширения (<i>R231322</i>)

Для проверки работоспособности продукционных правил использован программный комплекс «Рапана». Проведено тестирование правил предикатов, входящих в базу знаний, показывающее, что все сущности, используемые базой знаний, задействованы.

В третьей главе показана высокая вариабельность технологических параметров (механических свойств стержней, режимов запрессовки стержневой смеси,

распределение температур в системе стержень–отливка–оболочка и др.), влияющих на качество стержней, оформляющих внутреннюю полость охлаждаемых лопаток и, тем самым, на качество получаемых отливок. Рассмотренная вариабельность не может быть учтена детерминированным расчетом пространственной точности отливки, но может быть оценена при использовании статистических математических методов, таких как искусственные нейронные сети и метод группового учета аргументов. Рассмотрена генеральная совокупность состоящая из 225 экспериментов. У каждого стержня замерен первоначальный прогиб в пяти сечениях (по три точки в сечении) и вычислены прогибы стержня в отливке, путем измерения толщин стенок в отливке.

Оценка точности внутренней полости охлаждаемых лопаток базируется на субъективно описанной физической модели, на которую были наложены определенные ограничения и, вследствие этого, появилась определенная погрешность между расчетными и реальными значениями прогиба стержня формирующего внутреннюю полость лопатки. Предлагается использовать нефизическую модель (используя метод группового учета аргументов) с теми же исходными параметрами (влияющими факторами), что и в существующей математической зависимости (физической модели). Метод группового учета аргументов позволяет добавить в модель внешний критерий (например, критерий регулярности), наличие которого позволяет создать модель оптимальной сложности. При функционировании ЭС применяются методы искусственного интеллекта: нейронные сети и метод группового учета аргументов. В ЭС существует возможность выдвигать рекомендации по корректировке технологического процесса при ТПП на основе статистики, сравнивая прогнозируемую, с помощью методов искусственного интеллекта, пространственную точность с требуемой конструктором. С помощью нейронных сетей осуществляется подбор технологических параметров (например, температурного перепада по толщине стержня исходя из необходимого значения прогиба стержня) – решение обратной задачи.

Применяя факторный анализ и выделяя группы влияющих факторов, с помощью метода группового учета аргументов выявляются весовые коэффициенты, показывающие степень влияния групп факторов. Используя математическую функцию в виде полиномиальной зависимости построены различные варианты моделей для всех сочетаний влияющих факторов и выбрана лучшая с точки зрения критерия регулярности. Получены статистические параметры качества выбранной модели. Анализируя полученную модель, можно сделать вывод о наличии скрытых физических закономерностей.

В четвертой главе представлены концептуальная модель ЭС, модель ЭС автоматизированного управления ТПП охлаждаемых лопаток с заданной пространственной точностью (рисунок 3), Схема взаимодействия ЭС с технологией изготовления охлаждаемых лопаток (рисунок 4), модель применения ЭС для изготовления отливок разной конфигурации из различных сплавов, а также алгоритм выработки рекомендаций по корректировке технологического процесса и алгоритм формирования новых знаний.

ЭС предназначена технологам для разработки качественного технологического процесса изготовления литых охлаждаемых лопаток турбин при ТПП. Система выдвигает рекомендации по корректировке технологических параметров процесса изготовления отливок. Основой для работы является существующий математический метод расчета пространственной точности лопаток. Однако погрешность этого метода составляет порядка 15 %.

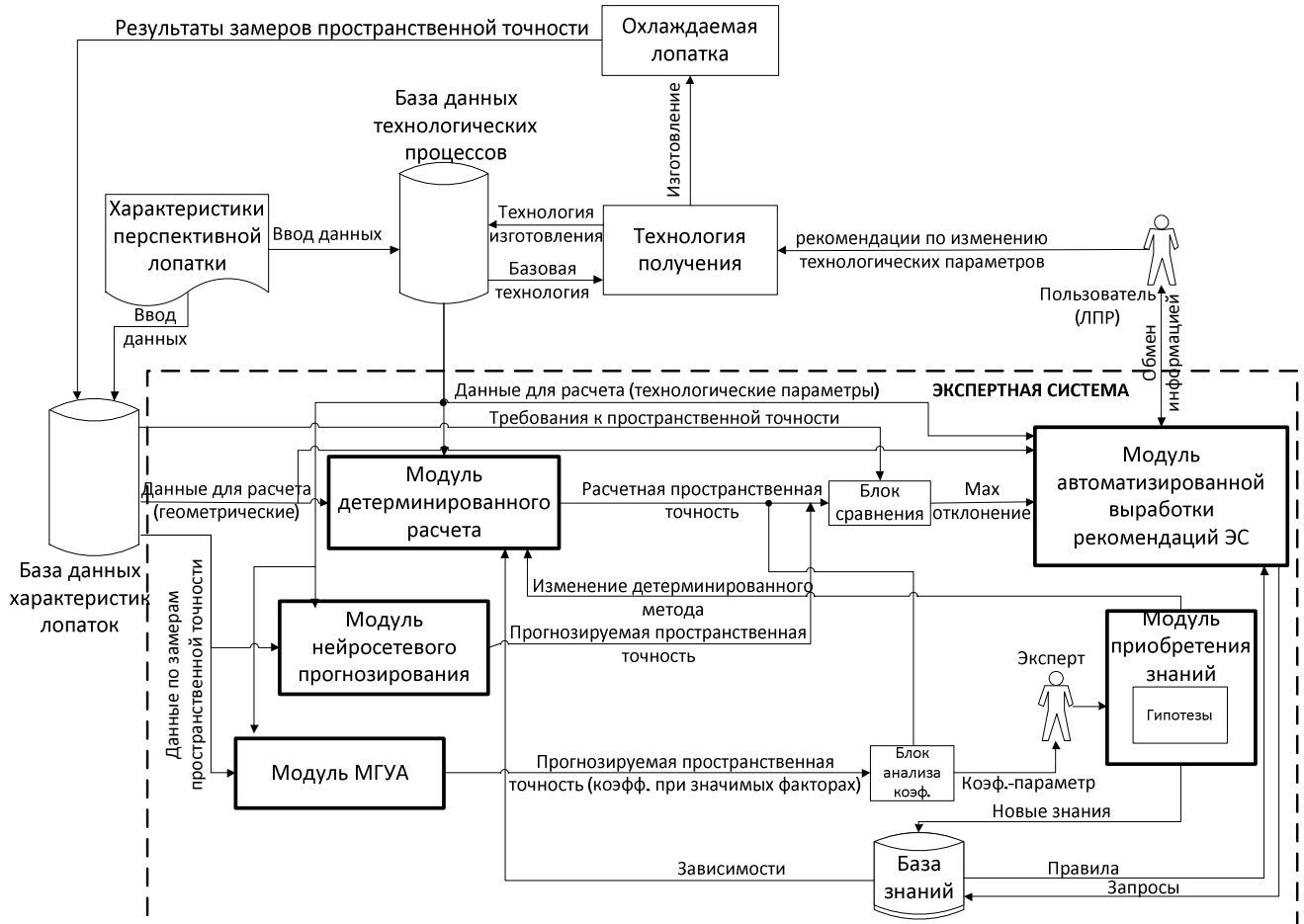


Рисунок 3 – Модель ЭС автоматизированного управления ТПП охлаждаемых лопаток с заданной пространственной точностью

В ЭС существует возможность, при накоплении статистики по замерам пространственной точности и параметрам технологического процесса, выдвигать гипотезы возникновения неточности математического метода, наличия скрытых физических закономерностей и т.п. В свою очередь, если гипотезы подтверждаются экспериментом, эксперт изменяет детерминированный метод расчета, а также вносит полученное новое знание в базу знаний. После получения нового знания ЭС способна давать более точные рекомендации по корректировке технологического процесса, тем самым приводя к снижению уровня брака.

Разработаны две базы данных для хранения необходимой, для работы ЭС, информации. База данных характеристик лопаток включает геометрические, конструкционные, эксплуатационные характеристики лопаток, а также требования к пространственной точности лопаток, заданные конструктором. База данных тех-

нологических процессов хранит в себе все технологии изготовления стержней, оболочек, лопаток и каждое их изменение.

При освоении отливки перспективной лопатки информация о ней вводится в базы данных. После этого в базе данных технологических процессов подбирается наиболее близкая по параметрам лопатки технология изготовления (базовая технология). Геометрические данные лопатки, а также технологические данные базовой технологии обрабатываются разработанным программным модулем детерминированного расчета.

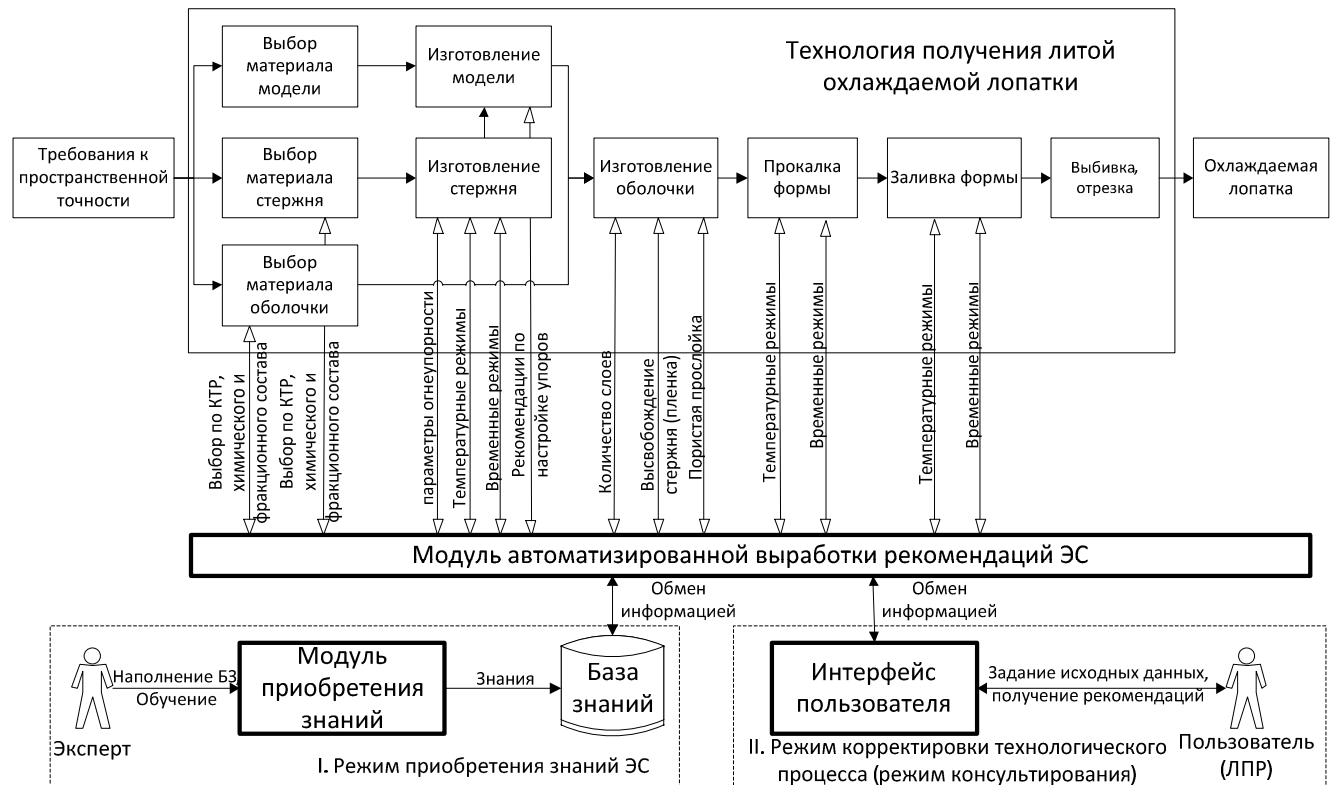


Рисунок 4 – Схема взаимодействия ЭС с технологией изготовления охлаждаемых лопаток

Автоматизированным детерминированным методом рассчитываются отклонения в 15 точках пера лопатки, на каждую из которых конструктором задан допуск (требования к пространственной точности). Расчетная пространственная точность сравнивается с требуемой и при наличии отклонений, посредством модуля выработки рекомендаций, ЭС вырабатывает рекомендации по изменению технологических параметров. На основе этих рекомендаций технолог корректирует технологический процесс изготовления отливок и, после корректировки, заново рассчитывает прогиб в модуле детерминированного расчета. Такие итерации происходят до тех пор, пока технолога (пользователя ЭС) не удовлетворят полученные значения расчетной пространственной точности. Полученная таким образом технология заносится в базу данных технологических процессов. По полученной технологии отливается опытная партия охлаждаемых лопаток.

На описанном этапе разработка и корректировка технологии происходит без активных экспериментов, путем проведения только пассивных. В процессе изго-

товления отливки замеряется пространственная точность каждой лопатки во всех 15-ти контролируемых точках, и результаты вносятся в базу данных характеристик лопаток – происходит сбор статистической информации. На основе статистического набора данных по замерам пространственной точности, а также значениям технологических параметров применяются два модуля: модуль нейросетевого прогнозирования и модуль прогнозирования методом группового учета аргументов. Пространственная точность, прогнозируемая нейростевым модулем, по мере роста статистической обучающей выборки, учитывает неопределенность технологического процесса, обусловленную вариабельностью технологических параметров изготовления отливки, и может оказаться более точной по сравнению с детерминированным расчетом. Сравнение результатов прогнозирования с требованиями конструктора позволяет выдвигать новые рекомендации по корректировке (управлению) технологического процесса. Важным этапом применения ЭС является способность получать новые знания, путем выдвижения и принятия гипотез. Модель пространственной точности, полученная модулем прогнозирования методом группового учета аргументов, сравнивается с детерминированным расчетом. Причем математическая функция метода группового учета аргументов подобрана таким образом, что она может быть использована при расчете коэффициентов для групп влияющих параметров. На основе величины коэффициентов можно сделать предположение о наличии скрытых физических зависимостей, которые могут выражаться в виде коэффициентов в модели, полученной с применением метода группового учета аргументов. На основе величины коэффициентов эксперт выбирает наиболее значимые группы влияющих параметров и делает предположения о причинах отклонения (установление пространства гипотез) расчетных значений пространственной точности от фактических. После анализа гипотез соответствующим образом, происходит их принятие, либо отклонение. Принятые гипотезы вводятся в базу знаний как новые знания. Также происходит изменение детерминированного метода расчета, если принятые новые знания затрагивают детерминированный расчет. Новые знания используются для управления ТПП.

Разработана программа детерминированного расчета «Расчет геометрической точности охлаждаемой лопатки турбины» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012619824), которая позволяет управлять величиной прогиба и угла разворота стержня, за счет изменения технологических параметров процесса их изготовления.

Выдвинут ряд гипотез отклонения расчетной пространственной точности от фактической, которые могут быть разделены на группы: гипотезы, связанные с необходимостью корректировки технологии изготовления охлаждаемых лопаток; гипотезы, связанные с необходимостью контроля размеров оснастки и стержней с помощью современных средств измерения и анализа (например, оптическая система ATOS); гипотезы, связанные с необходимостью применения современного оборудования на технологических этапах изготовления отливок; новые закономерности процесса формирования пространственной точности. Рассмотрена и принята гипотеза прогиба стержня в условиях упругопластической деформации,

которая позволила получить новые знания в протекании процесса формирования пространственной точности лопатки и уточнить детерминированный расчет.

Модель, полученная модулем прогнозирования методом группового учета аргументов до изменения детерминированного метода (прогиб стержня в условиях пластической деформации):

$$Model = 0,9977x_i - 5,652 \cdot 10^6 x_j + 16,15x_k - 0,3057x_m, \quad (2)$$

где x_i – первоначальный прогиб стержня, умноженный на коэффициент осевой нагрузки стержня, мм;

x_j – прогиб от эксцентричного приложения возникающей осевой нагрузки, умноженный на коэффициент осевой нагрузки стержня, мм;

x_k – прогиб от неравномерного распределения температуры по толщине стержня, умноженный на коэффициент осевой нагрузки стержня, мм;

x_m – прогиб от неравномерного распределения температуры по ширине стержня, умноженный на коэффициент осевой нагрузки стержня, мм.

Модель, полученная модулем прогнозирования методом группового учета аргументов после изменения детерминированного метода (прогиб стержня в условиях упругопластической деформации):

$$Model = 0,9611x_i - 0,4813x_j + 12,41x_k - 0,3512x_m \quad (3)$$

Сравнения параметров качества моделей прогнозирования пространственной точности литых охлаждаемых лопаток ГТД приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнения параметров качества моделей

Параметр	До изменения детерминированного метода	После изменения детерминированного метода
Среднеквадратическое отклонение	0,057	0,052
Средняя абсолютная ошибка	0,047	0,043
Максимальное отклонение в отрицательную сторону от опытного	- 0,121	- 0,113
Максимальное отклонение в положительную сторону от опытного	0,121	0,114

На основе процесса формирования гипотез происходит обучение ЭС, позволяющее получать новые знания, которые увеличивают мощность базы знаний, а следовательно, и мощность ЭС.

На рисунке 5 представлена модель ЭС управления пространственной точностью охлаждаемых лопаток. Модель показывает возможность применения предложенной ЭС для управления пространственной точностью при изготовлении охлаждаемых лопаток любой конфигурации (многоканальные лопатки, внутренняя полость которых оформляется стержнями-балками; лопатки, внутренняя полость которых формируется стержнями-пластинами; лопатки со сложными полостями, получаемыми стержнями, имеющими сложный профиль, лопатки с перфорацией стержней, образующих развитую поверхность внутренней полости, для повышения эффективности ее охлаждения при эксплуатации)

методом литья по выплавляемым моделям. Принципы управления точностью изготовления отливки для всех типов лопаток одинаковы, отличие будет только в наполнении баз данных и базы знаний ЭС.

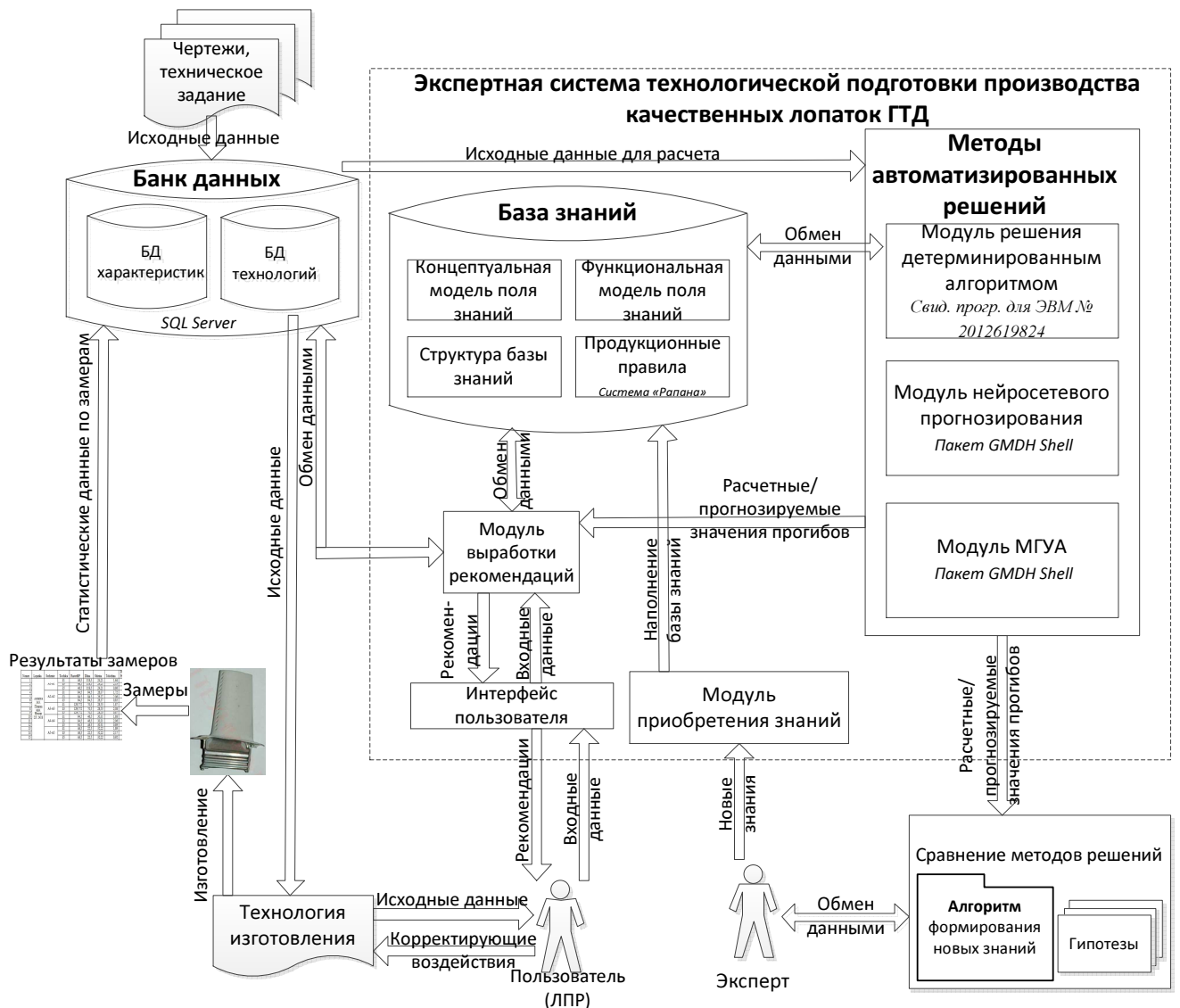


Рисунок 5 – Модель ЭС управления пространственной точностью охлаждаемых лопаток

Таким образом, применение ЭС позволяет: автоматизировать ТПП качественных охлаждаемых лопаток с учетом требования конструктора и геометрических особенностей лопатки; обеспечивать заданную пространственную точность отливки; сократить расход дорогостоящих материалов (жаропрочные сплавы для лопаток дороги и не пригодны для повторного переплава) и время разработки технологии (цикл активного эксперимента может достигать 30 дней), что в свою очередь приведет к снижению затрат на разработку технологии и, как следствие, экономии ресурсов предприятия.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложена формализация процесса изготовления охлаждаемой лопатки с заданной пространственной точностью с точки зрения системы стержень–отливка–оболочка, позволившая применить методы системного анализа в литейном производстве и:

- определить комплекс факторов (температурных, граничных условий стержень–форма, свойств применяемых материалов и др.), влияющих на отклонение пространственной точности внутренней полости отливки на различных технологических этапах;

- установить взаимосвязи элементов системы, приводящих к изменению пространственной точности отливки;

- выявить взаимодействия элементов, возникающих под воздействием внешних факторов.

2. Разработана база знаний ЭС, включающая формализованные знания – теплофизические и механические характеристики формы и стержня, геометрические характеристики лопатки, знания в виде технологического опыта, полученного путем интервьюирования технологов и других работников производства (всего более 20 правил продукции и 10 функциональных зависимостей), обеспечивающая эффективное применение всего комплекса знаний при автоматизированном управлении ТПП.

3. Разработан метод управления технологическим процессом изготовления охлаждаемых лопаток ГТД, позволяющий в автоматизированном режиме, на основе отклонений пространственной точности от требуемой конструктором, выдвигать рекомендации по корректировке технологического процесса, снижающий брак по разнотолщинности на 12–15 %. Разработаны алгоритмы функционирования ЭС для прогнозирования и повышения пространственной точности литых охлаждаемых лопаток ГТД, формализующие процесс формирования рекомендаций.

4. Разработана концептуальная модель и метод повышения пространственной точности литых охлаждаемых лопаток, алгоритм формирования новых знаний, позволяющие на основе данных об отклонении пространственной точности литых охлаждаемых лопаток выдвигать гипотезы, раскрывающие механизм искажения геометрии отливки, и вырабатывать новые знания увеличивающие мощность экспертной системы.

5. Разработана модель ЭС управления технологическим процессом изготовления различных по конфигурации отливок, позволяющая корректировать технологию их изготовления в зависимости от способа литья, применяемого сплава для снижения уровня брака на 10–15% по различным видам дефектов.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. ЭС в литейном производстве могут найти применение в других видах литья, где наблюдаются различные виды брака, и позволят управлять качеством изготавливаемых отливок.

ПУБЛИКАЦИИ, ОТРАЖАЮЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В рецензируемом журнале из списка ВАК

1. Возможность применения экспертных систем в CALS-технологиях литейного производства / С. П. Павлинич, А. С. Горюхин, А. Г. Сусенков, Е. С. Гайнцева // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2011. Т. 15, № 2 (42). С. 158–163.

2. База знаний экспертной системы получения качественной отливки лопатки турбины / С. П. Павлинич, А. С. Горюхин, Е. С. Гайнцева // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2013. Т. 17, № 1 (54). С. 86–91.

В других изданиях

3. Особенности применения CALS-технологии в литейном производстве / Е. С. Гайнцева, А. С. Горюхин // Литейные процессы: межрег. сб. науч. тр. ; под ред. В. М. Колокольцева. Магнитогорск: МГТУ, 2010. Вып. 9. С. 186–193.

4. Применение элементов искусственного интеллекта в CALS технологиях литейного производства / Е. С. Гайнцева, А. С. Горюхин // Мавлютовские чтения: Всерос. молодежн. науч. конф.: сб. тр. в 5 т. Уфа: УГАТУ, 2010. Т. 3. С. 73–75.

5. Формирование базы знаний при разработке экспертной системы для получения лопаток турбин / Е. С. Гайнцева, А. С. Горюхин // Ползуновский альманах. № 4. 2010. С. 192–194.

6. Экспертные системы в литейном производстве / Е. С. Гайнцева, А. С. Горюхин, Г. Г. Куликов // Мавлютовские чтения: Росс. науч.-техн. конф., посв. 85-летию со дня рождения чл.-корр. РАН, проф. Р. Р. Мавлютова: сб. тр. Уфа: УГАТУ, 2011. Т. 5. С. 57–61.

7. Разработка программного обеспечения получения качественных отливок охлаждаемых лопаток / Е. С. Гайнцева // Мавлютовские чтения: Всеросс. молодежн. науч. конф.: сб. тр. в 5 т. Уфа: УГАТУ, 2012. Т. 2. С. 176–177.

8. Управление литейным производством с использованием CALS-технологий [Электронный ресурс] / Г. Г. Куликов, Е. С. Гайнцева [и др.]; Учебн. электрон. издание. Уфа: УГАТУ, 2012. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)

9. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2012619824 от 14 ноября 2012. Расчет геометрической точности охлаждаемой лопатки турбины / А. С. Горюхин, Е. С. Гайнцева. М.: Федер. сл. по интел. собств., патентам и тов. знакам, 2013.

10. Прогнозирование точности получения охлаждаемых лопаток с использованием методов искусственного интеллекта / Е. С. Гайнцева // Актуальные проблемы в науке и технике. Т. 1: Информационные и инфокоммуникационные технологии: сб. науч. тр. 8-й Всеросс. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых, (Уфа, 19–20 февр. 2013). Уфа: УГАТУ, 2013. С. 86–90.

Соискатель



Е. С. Гайнцева

ГАЙНЦЕВА Екатерина Сергеевна

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА
ЛОПАТОК ГТД НА БАЗЕ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

Специальность 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами» (в промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 14.10.2013. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman Cyt.
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр. –отт. 1,0. Уч.–изд. л.0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № 546.

ФБГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12