

УДК 621.74:004.891

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА БАЗЕ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

С. П. Павлинич¹, А. С. Горюхин², Е. С. Гайнцева³

²goruhinas@yandex.ru, ³gaintsevae@yandex.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 21 апреля 2014 г.

Аннотация. Рассматриваются возможности применения экспертных систем в области литейного производства при разработке технологии новой номенклатуры изделий (лопатки турбин) и поиска причин возникновения брака. Дается алгоритмическая постановка решения задачи прогнозирования.

Ключевые слова: экспертная система; база знаний; лопатка турбины; отливка; пространственная точность; технологическая подготовка производства.

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. Основной способ изготовления заготовок охлаждаемых лопаток – это литье по выплавляемым моделям с применением керамических стержней, оформляющих внутреннюю полость отливки. Толщина стенок пера охлаждаемых лопаток может изменяться 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 [1].

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.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУТП) является применение экспертных систем (ЭС), которые позволяют сконцентрировать основные знания и технический опыт специалистов для автоматизированного управления тех-

нологическим процессом освоения и изготовления качественных охлаждаемых лопаток.

Наиболее важным достижением искусственного интеллекта является разработка мощных компьютерных систем, таких как экспертные, то есть систем, основанных на знаниях [3, 4]. В настоящее время в задачах управления сложными многопараметрическими системами, производственными и технологическими процессами зачастую приходится сталкиваться с решением трудноформализуемых задач.

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКОЙ ПРОИЗВОДСТВА ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК

Предлагается ЭС, предназначенная для работы технологов на этапе ТПП литых охлаждаемых лопаток турбин, позволяющая давать рекомендации по изменению технологических параметров процесса изготовления отливок. Основой для ЭС является существующий математический метод расчета величины прогиба стержня в отливке, погрешность которого составляет порядка 15 %.

В предлагаемой ЭС существует возможность сбора статистических данных фактических значений основных технологических параметров изготовления литых лопаток и характеристик их пространственной точности. Применение статистических методов обработки замеров отливок позволяет получать более адекватные математические модели, в которых

степень влияния отдельных групп факторов выражается значениями весовых коэффициентов. Анализируя наиболее значимые группы факторов, эксперт выдвигает ряд гипотез позволяющих снизить степень влияния рассматриваемых факторов на искажение пространственной точности.

В свою очередь, если гипотезы подтверждаются экспериментом, эксперт может изменить детерминированный метод расчета, а также внести полученное новое знание в систему производственных правил. Таким образом, осуществляется пополнение базы знаний (БЗ) ЭС [2]. После получения нового знания ЭС способна давать более точные технологические рекомендации по корректировке технологического процесса, тем самым приводя к снижению уровня брака.

В свою очередь не подтвержденные гипотезы могут так же привести к изменению существующей системы производственных правил, путем снятия возможных противоречий в системе.

При приближении детерминированного метода расчета прогиба стержня к реальному значению, можно раскрыть более полное физическое описание процессов, влияющих на коробление стержня. Более точное описание математической модели позволит дополнительно выявить значимые факторы, влияющие на качество литой охлаждаемой лопатки.

На рис. 1 представлена модель ЭС автоматизированного управления ТПП охлаждаемых лопаток с заданной пространственной точностью. На модели показаны две базы данных для хранения необходимой для работы системы информации. База данных характеристик лопаток хранит в себе геометрические, конструкционные, эксплуатационные и другие характеристики лопаток, требования к пространственной точности. База данных технологических процессов хранит в себе все технологии изготовления лопаток и каждое их изменение.

При поступлении документации на перспективную лопатку, 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 модулем детерминированного расчета. Детерминированным методом рассчитываются отклонения в 15 точках каждой литой лопатки.

ЭС, при помощи модуля автоматизированной выработки рекомендаций, предлагает рекомендации по изменению технологических пара-

метров. Технолог корректирует технологический процесс изготовления отливок и, после корректировки, опять переходит к модулю детерминированного расчета. Такие итерации происходят до тех пор, пока значения расчетной пространственной точности не окажутся приемлемыми для технолога (пользователя ЭС). Полученная в результате технология заносится в базу данных технологических процессов, по разработанной технологии производится изготовление литых лопаток.

Следует отметить, что на описанном выше этапе разработка и корректировка технологии происходит без активных экспериментов, путем проведения только пассивных. Это позволяет сократить расход дорогостоящих материалов (жаропрочные сплавы для лопаток дороги и не пригодны для повторного переплава) и времени разработки технологии (цикл активного эксперимента может достигать 30 дней), что в свою очередь приведет к снижению затрат на разработку технологии.

Основной задачей при разработке технологии является получение отливки с заданной пространственной точностью. Технология отливки состоит из нескольких базовых операций: выбора материалов модели, стержня, оболочки; изготовления стержня; изготовление модели; изготовление оболочки; проковки формы; заливки формы; выбивки, отрезки и финишных операций.

Модуль выработки рекомендаций ЭС в его взаимодействии с технологией изготовления литой охлаждаемой лопатки представлен на рис. 2.

При работе с ЭС технолог посредством интерфейса обменивается информацией с модулем выработки рекомендаций для последующей корректировки технологического процесса.

На различных этапах технологического процесса свои рекомендации:

- 1) выбор материала оболочки:
 - выбор коэффициента термического расширения оболочки;
 - выбор оболочки по химическому составу;
 - выбор фракционного состава оболочки и др.
- 2) выбор материала стержня:
 - выбор коэффициента термического расширения стержня;
 - выбор стержня по химическому составу;
 - выбор фракционного состава стержня и др.

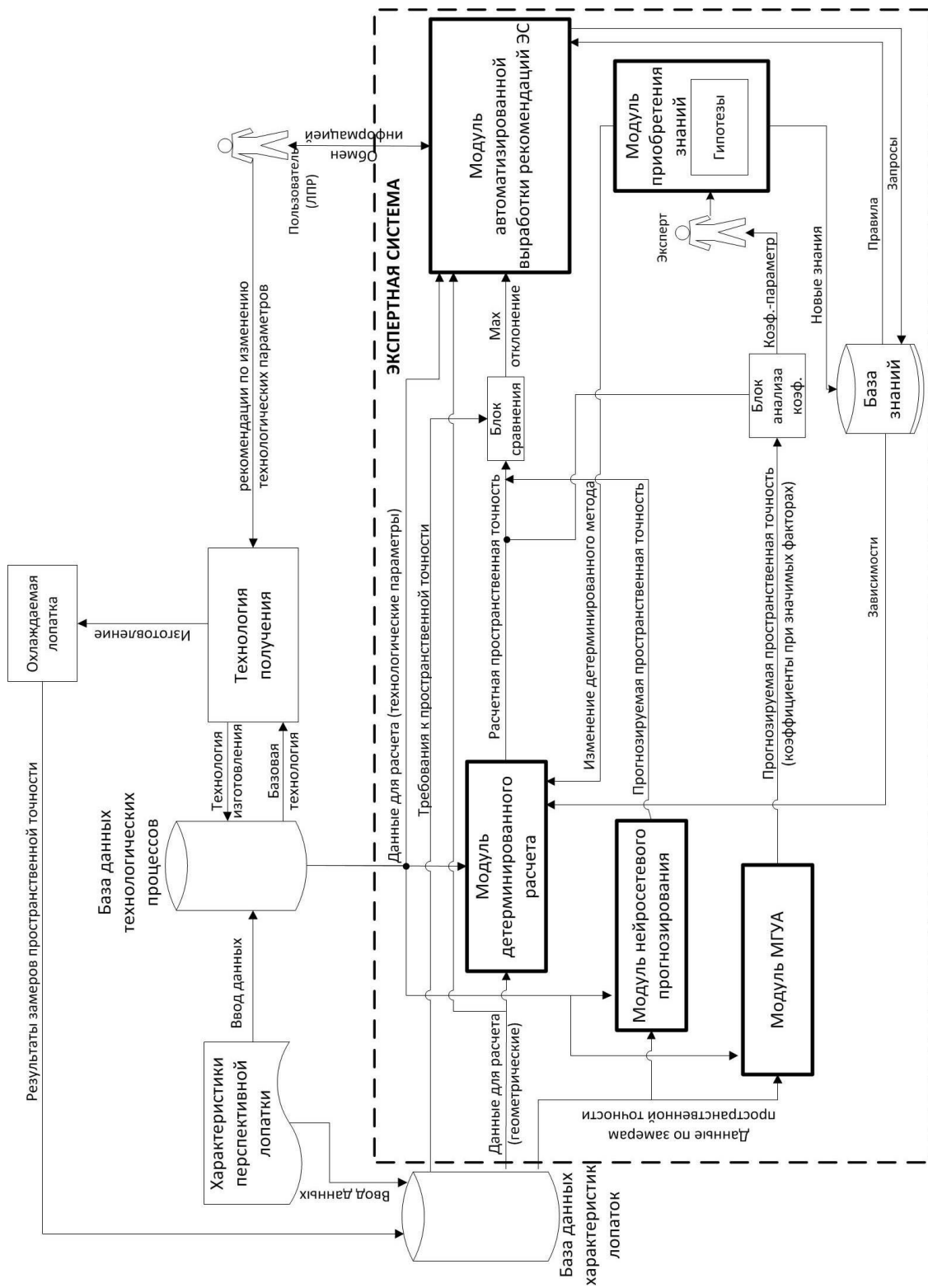


Рис. 1. Модель ЭС автоматизированного управления ТПП охлаждаемых лопаток с заданной пространственной точностью

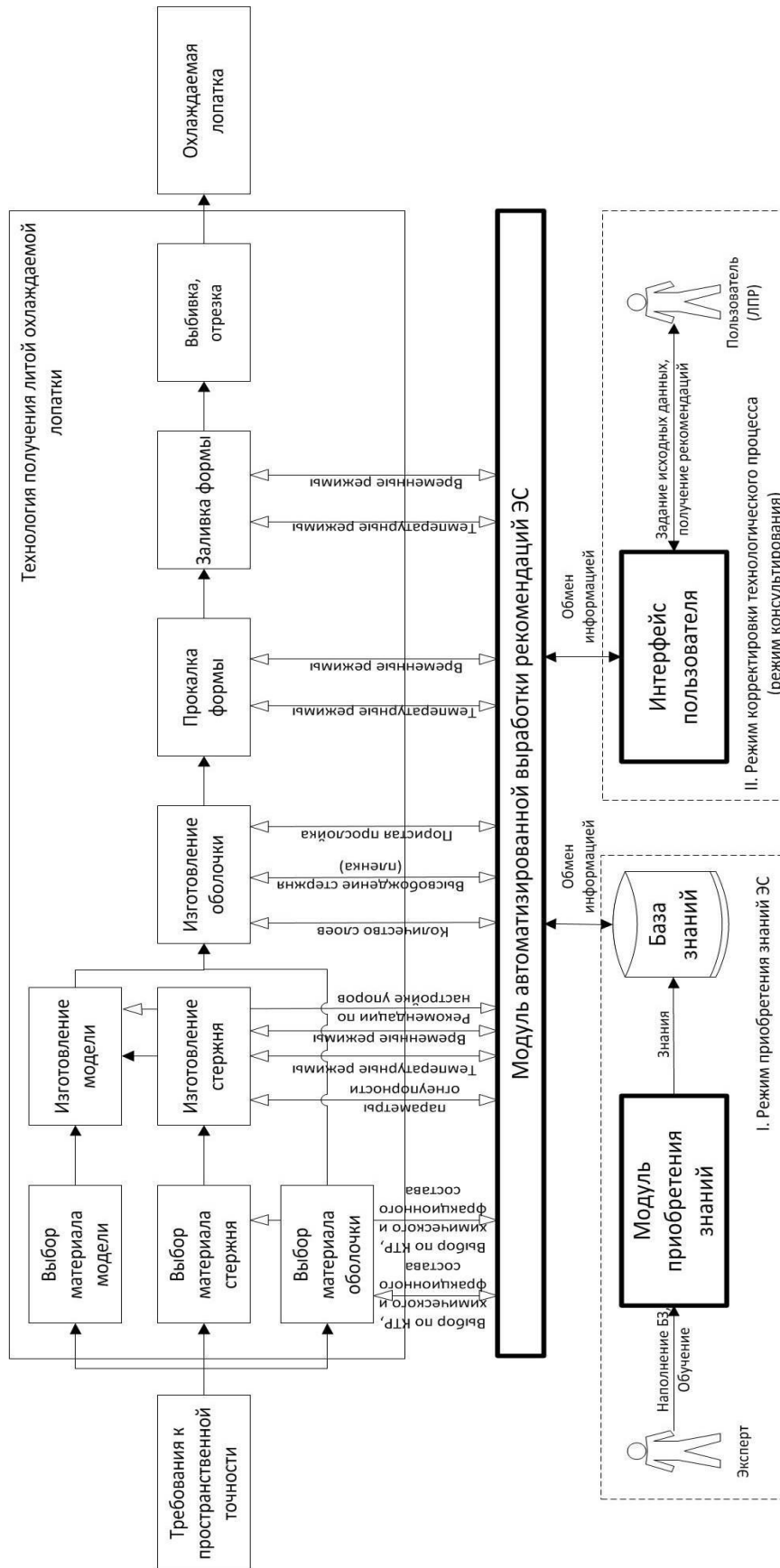


Рис. 2. Схема взаимодействия ЭС с технологией изготовления охлаждаемых лопаток

- 3) изготовление стержня:
 - подбор компонентов стержневого материала по требуемой огнеупорности стержня;
 - выбор температурных режимов обжига;
 - выбор временных режимов обжига;
 - рекомендации по укладке стержней в короба для обжига и др.
- 4) изготовление оболочки:
 - выбор количества слоев формы и количества слоев в зоне расположения знаков стержня;
 - высвобождение стержня с помощью выгораемой ленты или модельной массы;
 - использование пористой прослойки в зоне расположения знака и др.
- 5) прокаливание формы:
 - выбор температурных режимов прокаливания;
 - выбор временных режимов прокаливания;
 - выбор скорости нагрева формы при прокаливании и др.
- б) заливка формы:
 - выбор температурных режимов формы, сплава;
 - выбор временных режимов заливки и охлаждения и др.

При работе с ЭС эксперт посредством модуля приобретения знаний наполняет БЗ новыми знаниями (обучает), полученными на основе теоретических исследований процесса, приобретенными в результате практической деятельности, а также знаниями, полученными при помощи самой ЭС.

ПЕРСПЕКТИВА ПРИМЕНЕНИЯ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ОТЛИВОК РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ ЛИТЬЯ

Применение методов искусственного интеллекта в литейном производстве, в частности ЭС, позволит значительно ускорить освоение новых наукоемких отливок из различных сплавов – от традиционных стальных до цветных и жаропрочных. ЭС позволит собрать, структурировать и систематизировать основные знания по перспективным видам литья, таким как литье под низким давлением, центробежное литье титановых и интерметаллидных сплавов, литье в металлические формы, а также литье в песчаные формы.

Предлагаемые модели могут быть применены для управления пространственной точностью изготовления 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, оребрение и перфорации, образующие развитую поверхность внутри лопатки, для повышения эффективности ее охлаждения при эксплуатации). Последовательность управления точностью изготовления отливки для всех типов лопатки одинакова, отличие будет только в наполнении баз данных, БЗ и входных характеристик охлаждаемых лопаток.

Таким образом, модель ЭС управления пространственной точностью охлаждаемых лопаток показывает возможность применения ЭС для изготовления всей гаммы охлаждаемых лопаток методом литья по выплавляемым моделям.

Разработанная модель ЭС управления пространственной точностью охлаждаемых лопаток (рис. 1) и при ее расширении до модели ЭС для изготовления отливок разной конфигурации из различных сплавов позволит применять ЭС для снижения уровня брака по различными видами дефектов:

- коробление стержней и отливок;
- пористость отливок;
- несоответствие заданной структуре отливки (поликристаллической, направленной, монокристаллической);
- повышенная шероховатость поверхности;
- неметаллические включения;
- негерметичность отливки и т. д.

Основная информация по каждому виду литья для управления заданным показателем качества формируется в отдельной ЭС.

Каждый дефект отливки образуется в результате отклонений технологических параметров, изучая процессы таких отклонений, эксперт постоянно пополняет БЗ новыми правилами. На модели ЭС для изготовления отливок разной конфигурации из различных сплавов рассмотрены технология изготовления отливок:

- литьем по выплавляемым моделям (ЛВМ);
- литьем в металлические формы (ЛПД, кокиль);
- литьем в песчаные формы (ПГФ) и др.

Все эти технологии закладываются в банк данных, куда вносится информация о типах отливок (размеры, марка сплава, технические требования к отливке и др.). Характеристики отливок закладываются в банк данных, пополнение

которого осуществляется с чертежей деталей и технических требований.

Каждый вид литья и каждый вид брака имеет свою теоретическую описательную базу причинно-следственных связей, объясняющих возникновение дефектов. Используя предложенные модули расчета, можно добиться снижения уровня брака на 10–15 % вне зависимости от вида литья и характера возникновения дефекта [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая модель ЭС автоматизированного управления ТПП охлаждаемых лопаток с заданной пространственной точностью позволяет прогнозировать прогиб и угол разворота различных стержней, предлагать технологические рекомендации по снижению уровня брака на основе производственных правил, пополнять БЗ новыми знаниями, увеличивающими точность прогнозирования прогиба и угла разворота стержня в отливке. Модель ЭС управления пространственной точностью охлаждаемых лопаток, которая отражает: структуру, основные принципы построения и функционирования системы, а также ее взаимодействие с участниками процесса ТПП (пользователем и экспертом), обмен информацией с банком данных. Использование методов сравнения расчетных значений с прогнозируемыми позволяет формировать новые знания на основе выдвигаемых экспертом гипотез. Модель может быть применена при изготовлении охлаждаемых лопаток с различной конфигурацией внутренней полости. Показана возможность применения ЭС для управления другими характерными дефектами отливок (металлургическими дефектами – усадкой, пористостью; неметаллическими включениями – засором, окисными пленками, керамическими включениями и т. д.), а также применения ЭС для управления качеством отливок, получаемых другими методами литья: в песчаные и металлические формы, под низким и высоким давлением и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлинич С. П., Горюхин А. С., Сусенков А. Г., Гайнцева Е. С. Возможность применения экспертных систем в CALS-технологиях литейного производства // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 15, № 2 (42). С. 153–158. [S. P. Pavlinich, A. S. Gorukhin, A. G. Susenkov, and E. S. Gayntseva, "Possibility of application of expert systems in CALS technologies at the foundry," (in Russian), *Vestnik UGATU*, vol. 15, no. 2 (42), pp. 153-158, 2012.]
2. Павлинич С. П., Горюхин А. С., Гайнцева Е. С. База знаний экспертной системы получения качественной отливки лопатки турбины // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 1

(54). С. 86–91. [S. P. Pavlinich, A. S. Gorukhin, and E. S. Gayntseva, "The knowledge base of the expert system of manufacturing high-quality casting turbine blade" (in Russian), *Vestnik UGATU*, vol. 17, no. 1 (54), pp. 86-91, 2013.]

3. Павлов С. Н. Системы искусственного интеллекта: учеб. пособие: в 2 ч. Томск: Эль Контент, 2011. Ч. 1. 176 с. [S. N. Pavlov, *Artificial Intelligence systems*, (in Russian), part 2. Tomsk: El Content, 2011.]

4. Филиппович Ю. Н., Филиппович А. Ю. Системы искусственного интеллекта. М.: МГУП, 2009. 312 с. [U. N. Philippovich, A. U. Philippovich, *Artificial Intelligence Systems*, (in Russian). Moscow: MGUP, 2009.]

ОБ АВТОРАХ

ПАВЛИНИЧ Сергей Петрович, зав. каф. машин и технологии литейного производства. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1976). Канд. техн. наук (УрФУ, 1999). Д-р техн. наук (там же, 2008), проф. Иссл. в обл. технол. сл. отливок в авиац. промышленности.

ГОРЮХИН Александр Сергеевич, доц. каф. машин и технологии литейного производства и каф. АСУ. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1965). Канд. техн. наук по литейн. пр-ву (МВТУ, 1979). Иссл. в обл. технол. сл. отливок в авиац. пром-ти.

ГАЙНЦЕВА Екатерина Сергеевна, асс. каф. машин и технологии литейного производства и каф. АСУ. Дипл. инж. (УГАТУ, 2008). Канд. техн. наук. по АСУ (там же, 2013). Иссл. в обл. иск. интеллекта.

METADATA

Title: Technological preparation of production gas turbine engine blades based expert system

Authors: S. P. Pavlinich, A. S. Gorukhin, E. S. Gaintseva.

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: goruhinas@yandex.ru, gaintsevae@yandex.ru.

Source: *Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 3 (64), pp. 175-180, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The possibility of expert systems application at technology development in the new range of products (turbine blades) and search for the causes of spoilage in foundry are discussed in article. An algorithmic solution definition of forecasting problem is presented.

Key words: expert system; knowledge base; turbine blades; casting; spatial accuracy; technological preparation of production

About authors:

PAVLINICH, Sergei Petrovich, Prof., Dept. of Machinery and Technology foundry. Cand. of Tech. Sci. (YrFY, 1999). Dr. of Tech. Sci (YrFY, 2008).

GORUKHIN, Alexander Sergeevich, Docent, Dept. of Machinery and Technology foundry and Dept. of Automated Systems. Cand. of Tech. Sci. (MVTU, 1979).

GAYNTSEVA, Ekaterina Sergeevna, Dept. of Machinery and Technology foundry and Dept. of Automated Systems, Cand. of Tech. Sci. (UGATU, 2013).