

УДК 338.32.053.4:62-521

© И. Н. Хаймович¹, А. С. Кутумов², В. М. Рамзаев³, 2021

^{1,2} Самарский национальный исследовательский
университет им. академика С. П. Королева
(Самарский университет);

^{1,3} Самарский университет государственного управления
«Международный институт рынка»
(Университет «МИР»), Россия

E-mail ¹: kovalek68@mail.ru

E-mail ²: archosg.ps6@gmail.com

ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИИ ЗАГОТОВОК И ШТАМПОВ КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Статья посвящена организационно-экономическому моделированию системы автоматизации проектирования заготовок и штампов компрессорных лопаток авиационных двигателей. Особое внимание уделено важности производительности изготовления компрессорных лопаток, их стоимости, рабочим нагрузкам, производственному браку. Предложен метод производства штамповой оснастки с использованием базовых возможностей САД-систем, который позволит сократить время производства компрессорных лопаток авиационных двигателей в 15-20 раз, повысив при этом качество изготавливаемых изделий.

Ключевые слова: конструкторско-технологическая подготовка производства, информационная поддержка изделия, автоматизация проектирования, газотурбинные двигатели, компрессорные лопатки.

Введение

В настоящее время стало актуальным внедрение на российских производственных предприятиях «умного производства» — производства, организованного в едином информационном пространстве комплекса производственных процессов, к которым можно отнести конструкторско-технологическую подготовку производства, технологические процессы, организационно-экономическую подготовку, оперативную диспетчеризацию, управление всей производственно-хозяйственной деятельностью.

Организационно-экономическое моделирование с помощью системы автоматического проектирования (САПР) находит широ-

кое применение в многочисленных отраслях промышленности, в которых применяются компрессоры. С помощью САПР путем математических и информационных методов комплексной автоматизации можно снизить вредные условия труда на производстве и все возможные затраты на изготовление продукции (финансовые, временные), а также минимизировать вероятность ошибки при изготовлении изделия, повысив их качество и точность.

В связи с этим цель данной работы — путем математических и информационных методов комплексной автоматизации, используя базовые возможности CAD/CAE/CAM-систем и объектно-ориентированной САПР, провести анализ организационно-экономического моделирования системы автоматизированного формирования пространственных моделей элементов штамповок оснастки, который позволит снизить вредные условия труда на производстве, уменьшить финансовые и временные затраты при изготовлении компрессорных лопаток авиационных двигателей, повысить качество изготавливаемых изделий.

Объектом исследования является многономенклатурная производственная система, предмет исследования — использование возможности CAD/CAE/CAM-систем и объектно-ориентированной САПР для изготовления шаблона компрессорных лопаток.

Результаты исследования

Турбина авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) является главным силовым агрегатом, находящимся на одном валу с компрессором низкого давления, в котором сжимается воздух. Сжатый воздух попадает в компрессор высокого давления, смешивается с топливом и воспламеняется в камере сгорания. Горячие газы, попадая на колесо турбины, приводят к ее вращению, а следовательно, и к вращению компрессора низкого давления, создавая реактивную тягу (получается замкнутая цепь). Таким образом, кинетическая энергия движущегося потока преобразуется в механическую энергию на валу.

Высокие температуры, возникающие в камерах сгорания, и высокие скорости вращения потребовали создания новых технологий и применения новых материалов для конструирования одного из наиболее ответственных элементов двигателя — статорных и роторных лопаток газовой турбины. Они должны в течение многих часов, не теряя механической прочности, выдерживать огромную температуру, при которой многие стали и сплавы уже плавятся. В первую очередь это относится к лопаткам турбины, так как они воспринимают

поток раскаленных газов, нагретых до температуры 1950 К, а в новых двигателях она дойдет до 2000-2200 К. Для них уже разработаны высокожаропрочные сплавы, содержащие до пятнадцати элементов таблицы Менделеева, в том числе рений и рутений, и теплозащитные покрытия, в которые входят никель, хром, алюминий и иттрий, а в перспективе – керамические покрытия из оксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия [3].

Неотъемлемой частью любой современной турбины является система охлаждения. В турбинах высокого давления охлаждаются: корпус, диски рабочих колес, встроенные подшипники, детали системы управления радиальными зазорами. Наиболее сложным элементом системы охлаждения турбины являются сопловые и рабочие лопатки турбины высокого давления как наиболее теплонапряженные детали, определяющие ресурс турбины и двигателя в целом [4].

На рисунке 1 представлены виды лопаток компрессора (слева) и лопаток турбины (справа), их основные характеристики и стоимость их изготовления [2].

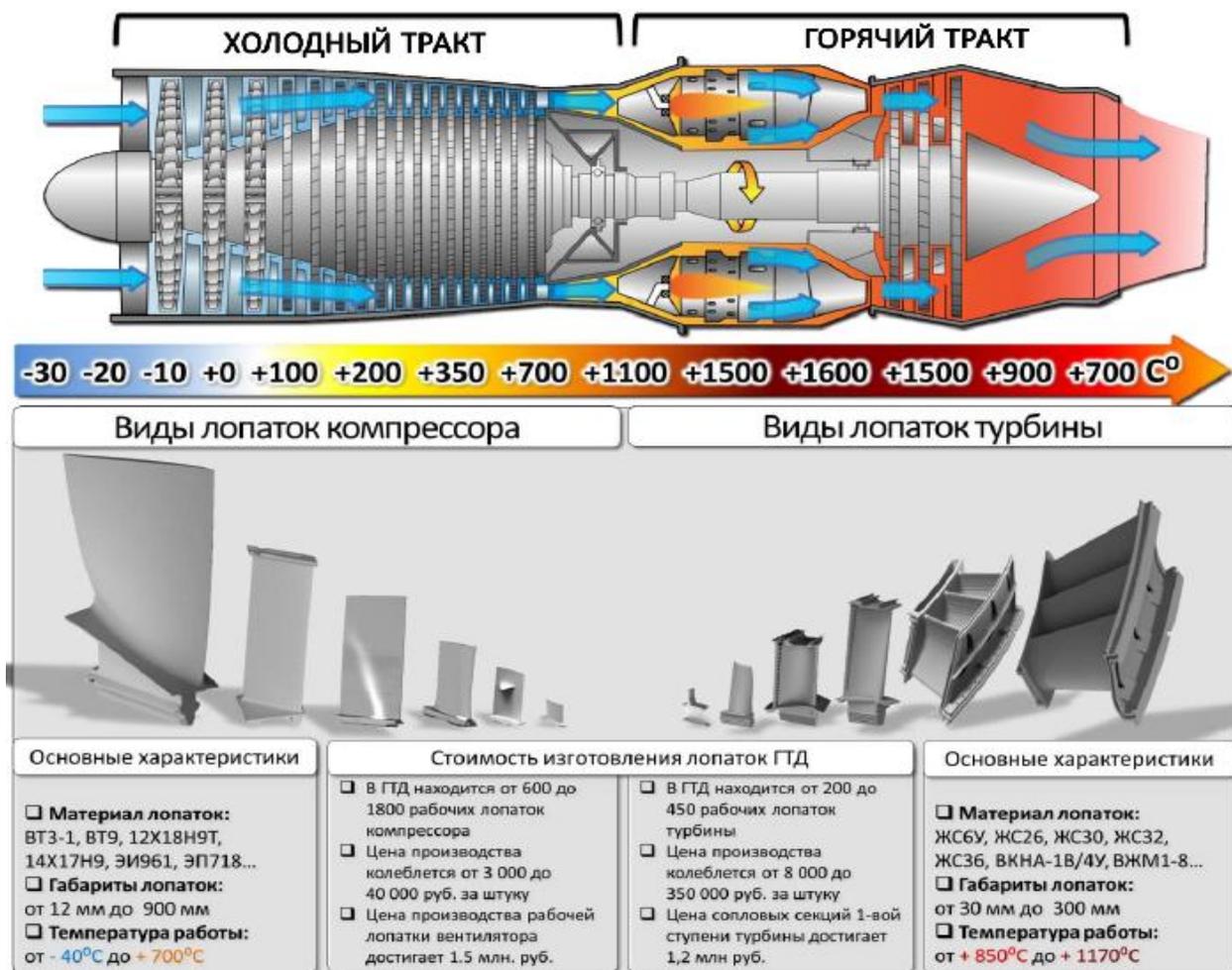


Рис. 1. Виды лопаток компрессора (слева) и лопаток турбины (справа)

Степень сжатия компрессора и КПД работы турбины в основном базируются на эффективности и надежности лопаток — именно это служит объяснением их немалой стоимости при производстве.

Например, для замены комплекта лопаток третьей ступени лопастей вентилятора компрессора низкого давления (рис. 2) при обслуживании AIRBUS A320NEO двигателей 1100G-JM компании International Aero Engines (IAE) LLC Pratt & Whitney (PW) оценивается в 750 000 долл [3].



Рис. 2. Третья ступень компрессора низкого давления

Из всего выше изложенного следует, что лопатки компрессора и турбины — одни из самых наукоемких деталей ГТД — требуют сложнейших расчетов при проектировании, а также очень высокой точности изготовления. Продолжительность цикла получения готовой детали при этом может достигать более полугода. Наиболее часто проблемы возникают в местах перехода от сечения к сечению, так как в процессе изготовления не обеспечивается необходимая плавность. Например, проектирование лопатки занимает от 2,5 месяцев (400 часов), далее лопатки отливают методом монокристаллического литья в керамические формы по выплавляемым моделям, что в свою очередь влияет на качество и ресурс двигателя [1], при ее изготовлении нужна высокая квалификация рабочего на окончательных ручных операциях по доводке профиля пера лопаток до размеров изделия, заданных в соответствующей регламентирующей документации (еще 6 месяцев). Получаем 960 часов на изготовление одной лопатки. В итоге — затрачивается 1360 часов до получения штамповой оснастки с готовой лопаткой.

Еще в 1990-х гг. американские ученые провели исследование качества выпускаемых изделий на авиационных заводах, выяснив

следующее: 40% продукции было забраковано из-за ошибок в проектно-конструкторских разработках, чуть меньше (30%) — в связи с плохой организацией производства. Ко всему сказанному следует добавить, что порядка 30% продукции было забраковано из-за некачественных материалов и полуфабрикатов от поставщиков [8]. Полученные результаты согласуются с показателями, представленными в таблице 1 [5], приводя к логичному выводу, что путем повышения качества научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, привлечения надежных поставщиков с качественными материалами, добавления инновационной составляющей в производственный процесс, можно подняться на более высокий уровень качества выпускаемой продукции со сниженной себестоимостью.

Таблица 1

Причины дефектов, выявляемых в процессе эксплуатации авиационных двигателей

<i>Причины дефектов</i>	<i>Доля в общем объеме обнаруженных дефектов, %</i>
Недостатки проектирования	20...40
Низкое качество компонентов	40...65
Недостатки процесса конечной сборки	15...20

Стандартом качества работы японских предприятий уже более 20 лет является принцип «ноль дефектов» [5], он состоит в постоянном стремлении японских компаний к улучшению качества, вне зависимости от рентабельности таких мероприятий. Американский подход к модернизации выглядит по-другому: пока снижение дефектности дает экономию — на предприятии будут добиваться поставленной задачи, если это станет экономически не целесообразно — то дальнейшие мероприятия по повышению качества выпускаемой продукции предприняты не будут.

Следуя принципу «ноль дефектов», для улучшения характеристик выпускаемой продукции проведем анализ организационно-экономического моделирования системы автоматизации проектирования заготовок и штампов компрессорных лопаток авиационных двигателей, используя базовые возможности CAD/CAE/CAM-систем и объектно-ориентированной САПР. Использование задач САПР для проектировки конструкций поковки и формирования документов в виде готового чертежа приведет к повышению качества разработки и производства штамповой оснастки в 20 раз, что в свою очередь повлияет на точность проектных решений. При использовании базово-

вых возможностей CAD/CAE/CAM-систем немаловажным аспектом является выигрыш времени в подготовке производства. Внедрив CAD/CAE/CAM на предприятиях, обучив рабочий персонал, получим повышение производительности изготовления авиационных лопаток более чем в 15 раз.

Для того чтобы воплотить данный подход «в жизнь», необходимо [6]:

- формализовать представление структуры объекта моделирования;

- разработать методику автоматизации построения пространственных моделей и средств обеспечения, для чего формируется математическое описание процесса построения геометрических моделей объектов;

- создать язык описания облика технических объектов для построения их геометрических моделей;

- разработать алгоритм синтеза автоматизированного формирования моделей изделия;

- разработать структуру, программное и информационное обеспечение системы синтеза моделей;

- внедрить автоматизированную систему формирования математической модели в практику промышленного проектирования объектов авиационной техники.

Важное место в работе занимает создание комплекса программ для формирования геометрических моделей штампов. Но так как до сих пор бумажный чертеж остается основным документом при работе технолога, то необходимо сформировать структуру программы, которая будет выстраивать конструкцию заготовок и штампов, их чертежей, а также шаблоны штампов [7].

Внедрение во все процессы ИПИ-технологий должно проходить на основе концепции управления жизненным циклом изделия (PLM). Концепция PLM включает в себя разработку и внедрение взаимосвязанных прикладных решений, содержащих необходимые программные компоненты обеспечения коммуникаций, интеграции модулей автоматизированного проектирования, визуализации и других решений, охватывающих полный жизненный цикл изделия – от идеи до утилизации. Процессы создания, производства, поставки и эксплуатационного обслуживания изделий должны рассматриваться как целостный сквозной процесс на основе полного электронного описания изделия (ПЭОИ) с применением ИТ-технологий.

ПЭОИ – это совокупность данных в электронном виде, полученных на разных этапах жизненного цикла изделия, максимально

полно описывающих изделие. Эти данные должны быть взаимосвязаны и обладать следующими свойствами [8]:

- наследуемость при переходе изделия от одного этапа жизненного цикла изделия к другому;
- управляемость;
- доступность в соответствии с правами доступа пользователей (участников проектирования, изготовления, эксплуатации).

Основной массив данных ПЭОИ должен быть организован в виде электронных технических документов, имеющих аналоги технических документов, которые создаются при традиционной (бумажной) системе проектирования.

ПЭОИ создается с применением набора систем автоматизированного проектирования (CAD), инженерных расчетов и виртуального моделирования (CAE), технологической подготовки производств (CAM), управления данными изделиями (PDM) [9].

В создании ПЭОИ с применением обозначенного выше набора систем необходимо участие всех сотрудников, привлеченных к разработке изделия на всех его этапах. Выпуск документации на основе ПЭОИ (проектной, конструкторской, технологической, эксплуатационной) осуществляется в сквозном цикле [9].

Заключение

Комплексное использование возможностей программного обеспечения позволит улучшить совместную работу различных технологических служб предприятия на подготовительном этапе, значительно сократив время выпуска комплекта технологической документации.

Таким образом, путем применения алгоритмов и компьютерных программ в перспективе будет получено автоматизированное проектирование объектов заготовительного производства деталей сложных форм [7]. Уменьшив часы на проектирование штамповой оснастки, минимизировав ошибки в проектировании, получаем сниженную стоимость изготовления компрессорных лопаток авиационных двигателей, а это в условиях рыночной экономики является насущным вопросом.

Литература

1. Производство лопаток газотурбинных двигателей – «показатель высочайшего уровня развития машиностроения». URL: <https://naukatehnika.com/lopatki-turbin.html>.
2. Климов В. Г. Структура и свойства восстановленных лазерной наплавкой лопаток газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов : дис. ... канд. тех. наук / В. Г. Климов. Самара, 2019. 178 с.

3. Лопатки Airbus A320neo. Сколько стоит надежность двигателя. URL: <https://naukatehnika.com/lopatki-airbus-a320neo-skolko-stoit-nadezhnost-dvigatelya.html>.

4. Шевченко М. И. Проектирование охлаждаемых деталей ГТД с опережающей верификацией теплогидравлических моделей на примере охлаждаемых лопаток газовой турбины: дис. ... канд. тех. наук / М. И. Шевченко. М., 2016. 193 с.

5. Сутягин А. Н. Современные проблемы технологии производства авиационных двигателей: конспект лекций. Рыбинск: РГАТУ, 2016. 142 с.

6. Хаймович И. Н. Автоматизированное проектирование штамповой оснастки крупногабаритных деталей авиационного профиля из алюминиевых сплавов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2020. № 3. С. 110-116.

7. Хаймович И. Н. Автоматизация проектирования заготовок и штампов компрессорных лопаток авиационных двигателей (метод, алгоритмы, системы): монография. Самара: СНЦ РАН, 2014. 139 с.

8. Филатов А. Н. Разработка методов и моделей параллельного нисходящего проектирования ракетно-космической техники в едином информационном пространстве предприятия: дис. ... канд. тех. наук / А. Н. Филатов. Самара, 2014. 163 с.

9. Хаймович И. Н., Антипова О. И., Чекмарев А. Н., Чурилин С. В. Управление качеством конструкторско-технологической подготовки производства с использованием базовой концептуальной модели данных // Вестник Международного института рынка. 2020. № 1. С. 7-19.

*Статья поступила в редакцию 19.09.21 г.
Рекомендуется к опубликованию членом Экспертного совета
канд. экон. наук М. М. Васильевым*