

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ, ПОКРЫТИЙ И ДРУГИХ ВИДОВ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ И СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ахмедзянов Д. А., Кишалов А. Е., Маркина К. В., Игнатъев О. И.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа, Республика Башкортостан, Россия (450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12), e-mail: kishalov@ufanet.ru

Описывается разработанная экспертная система и база данных для автоматизированного выбора материалов, покрытий и других видов подготовки поверхности основных деталей и сборочных единиц проточной части авиационных газотурбинных двигателей. Рассмотрены основные принципы работы системы и структура базы данных. Экспертная система анализирует термогазодинамические параметры потока, оценивает температурное состояние основных элементов газо-воздушного тракта, определяет основные газовые и инерционные нагрузки, перебирает различные материалы из базы данных, назначает каждому материалу определённые баллы и формирует список из пяти материалов, набравших наибольшее количество баллов. Экспертная система также осуществляет выбор из базы данных композиционных материалов. Для материала, набравшего максимальное количество баллов, формируются рекомендации по различным вариантам покрытия и других видов подготовки поверхности. В статье приводятся примеры работы системы.

Ключевые слова: авиационные двигатели, экспертная система, база данных, авиационные материалы.

EXPERT SYSTEM FOR AUTOMATED SELECTION OF MATERIALS, COATINGS AND OTHER PREPARATION TYPES OF MAIN PARTS SURFACE AND AVIATION GAS TURBINE ENGINE ASSEMBLIES

Akhmedzanov D. A., Kishalov A. E., Markina K. V., Ignatev O. I.

«Ufa state aviation technical university», Ufa, Republic Bashkortostan (450000, Ufa, K. Marksa str., 12), e-mail: kishalov@ufanet.ru

This article describes the developed expert system and database for automated selection of materials, coatings and other preparation types of main parts surface and assemblies of aviation gas turbine engine air-gas channel. The basic principles of the system operation and the structure of the database are considered. Expert system analyses the thermogas dynamic flow characteristics, estimates the thermal condition of air-gas channel main parts, identifies the main gas and inertial force, searches different materials from the database, assigns each material certain score and generates the list of five materials, which have composed the maximal number of score. Expert system also realizes choice from the composite materials database. For material, which have composed the maximal number of score, the programmer makes recommendations of different coatings variants and other surface preparation types. In this article are shown the examples of system operation.

Keywords: aviation engines, expert system, database, aviation materials.

Введение

Проектирование авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) – это чрезвычайно трудоёмкая, сложная и творческая задача. К новым перспективным летательным аппаратам, а, соответственно, и к их энергетическим установкам, предъявляются жесточайшие требования по их основным характеристикам. В условиях рыночной экономики перспективные изделия должны быть спроектированы и изготовлены в кратчайшие сроки и с наименьшими затратами. Всё это требует очень высокой оптимизации характеристик отдельных элементов при работе всей системы на различных режимах работы и условиях эксплуатации [3]. Высокая степень согласования отдельных элементов в составе

авиационного двигателя возможна только в том случае, если ещё на стадии проектирования и выбора его конструктивной схемы решаются задачи прочностного анализа и выбора материала, покрытия и других видов подготовки поверхности основных деталей и сборочных единиц проточной части [5, 4].

База данных

Для выбора материала, покрытия и других видов подготовки поверхности авторами разработана база данных (БД) материалов, БД композиционных материалов, экспертная система по анализу нагрузок и теплового состояния основных элементов проточной части двигателя и автоматизированного подбора материала, покрытия и других видов подготовки поверхности.

Пример структуры разработанной БД материалов деталей авиационных двигателей, содержащую основную информацию о материалах для анализа, представлен в табл. 1.

Таблица 1
Структура разработанной БД материалов

Материал	Химическая маркировка материала	Рабочая температура, °С	Механические свойства				Физические свойства
			Температура испытания, °С	Модуль упругости E, ГПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, Мпа	Предел прочности σ_B , Мпа	Плотность, кг/м ³
ВЖ102	Х15Н30ВМТ	800	20	205	720	1040	8290
			600	166	560	900	
			700	160	500	700	
			800	152	400	540	
ЭП202	ХН67ВМТЮ	750	20	210	630	720	7800
			750	185	460	560	
ЭИ961	11Х12Н2ВМФ, 13Х11Н2В2МФ	600	20	200	850	950	7820
			300	175	720	830	
			400	165	680	750	
			450	157	625	700	
			500	145	570	650	
ЭИ481	37Х12Н8Г8МФБ	750	20	174	630	1000	7850
			500	130	490	680	
			600	124	460	620	
			750	112	330	420	
ЭП517	15Х12Н2МФВАБ	650	20	218,3	980	1100	7810
			300	199,6	850	980	
			400	191	830	930	
			550	-	580	770	
			600	-	450	550	
650	-	380	470				

Для моделирования деталей из композиционных материалов разработана БД композиционных материалов (табл. 2 и 3).

Таблица 2
Пример структуры разработанной БД волокон композиционных материалов

Материал	Рабочая температура, °С	Модель упругости, ГПа	Предел прочности σ , МПа	Плотность ρ , г/см ³
Углеволокна	2000	275,0	2875	1,750
Стекловолокна	250	82,5	2750	2,500
Органоволокна	200	137,5	2850	1,440
Борные волокна	900	387,5	3250	2,630
Карбид кремния	1500	450,0	2000	3,975
Стальные волокна	1200	210,0	450	7,800
Базальтовые волокна	1800	100,0	2375	2,850

Таблица 3

Пример структуры разработанной БД матрицы композиционных материалов

Материал	Рабочая температура, °С	Модель упругости, ГПа	Предел прочности σ , МПа	Плотность ρ , г/см ³	Метал / неметалл
Эпоксидная смола	250	3,00	75,0	1,205	Неметалл
Полипропилен	250	1,05	31,0	0,915	Неметалл
Алюминиевый сплав	550	70,50	215,0	2,700	Метал
Магниевый сплав	550	40,00	280,0	1,770	Метал
Титановая матрица	550	113,00	800,0	4,500	Метал
Полиимидное связующее PMR-15	250	3,20	55,8	1,100	Неметалл
СП-97	250	4,20	55,8	1,200	Неметалл

Экспертная система

Экспертная система (ЭС) разработана на базе системы имитационного термогазодинамического моделирования (СИМ) авиационных двигателей DVIGw [1], созданной при помощи Framework CAMSTO.

ЭС состоит из отдельных структурных элементов (СЭ) для прочностного анализа основных элементов газоздушного тракта двигателя и СЭ для выбора материалов, покрытий и других видов подготовки поверхности. Топологическая модель современного ГТД (в данном случае, двухконтурного турбореактивного двигателя с форсажной камерой – ТРДДФсм) с различными элементами ЭС для выбора материалов, покрытий и других видов подготовки поверхности основных элементов проточной части двигателя представлена на рис. 1. Для передачи информации между СЭ двигателя и СЭ ЭС разработан специальный вид взаимосвязи – информационный поток (см. рис. 1).

СЭ ЭС соединены с соответствующими СЭ двигателя информационными потоками, по которым ЭС получает от СЭ двигателя термогазодинамические параметры потока на входе и выходе из узла, площади поперечных сечений и другие параметры (например, частота вращения ротора). Некоторые элементы ЭС напрямую соединены с СЭ двигателя (СЭ для выбора материала входного устройства, камеры сгорания, форсажной камеры, выходного устройства), другие элементы ЭС соединены со СЭ двигателя через элементы прочностного анализа (СЭ для выбора материала рабочих лопаток турбины и компрессора).

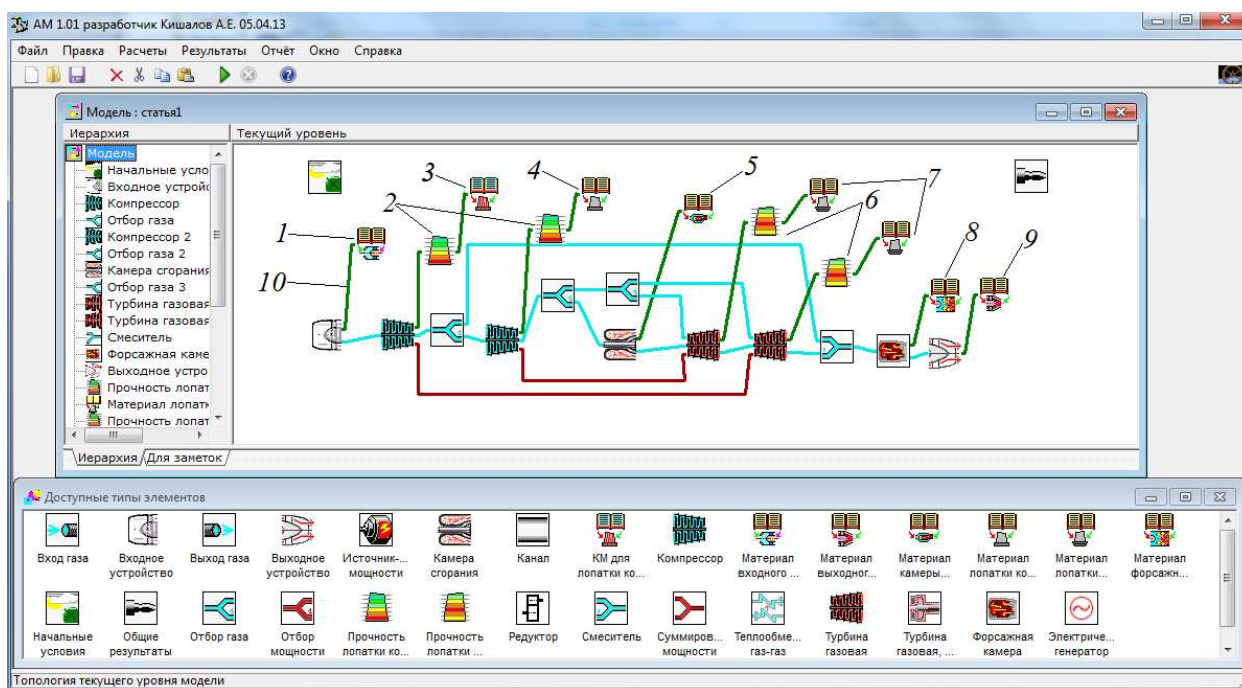


Рис. 1. Топологическая модель ТРДДФсм в ЭС для выбора материала, покрытия и других видов подготовки поверхности, где 1 – СЭ для выбора материала входного устройства; 2 – СЭ для прочностного анализа рабочих лопаток компрессора; 3 – СЭ для выбора композитного материала для рабочих лопаток компрессора; 4 – СЭ для выбора материала рабочих лопаток компрессора; 5 – СЭ для выбора материала корпуса и жаровой трубы основной камеры сгорания; 6 – СЭ для прочностного анализа рабочих лопаток турбины; 7 – СЭ для выбора материала рабочих лопаток турбины; 8 – СЭ для выбора материала корпуса и теплозащитных экранов форсажной камеры; 9 – СЭ для выбора материалов выходного устройства; 10 – информационный поток между СЭ

СЭ ЭС получают необходимую информацию от СЭ двигателя, анализируют и обрабатывают её. Затем СЭ ЭС обращаются к БД материалов (или композиционных материалов), считывают строчку из БД. Далее ЭС назначает каждому материалу баллы. Баллы начисляются за рабочую температуру материала (сравнивается с полученными в расчёте температурами анализируемых деталей), за предел прочности (чем больше предел прочности материала при данных температурах, тем больше баллов у материала), за плотность (чем больше плотность материала, тем меньше баллов), за технологичность материала (технологические свойства – свариваемость, штампуемость, возможность литья и т.п.). Программа перебирает материалы из БД и формирует список из пяти материалов, набравших максимальное количество баллов (рис. 2).

Для материала, набравшего максимальное количество баллов, формируются рекомендации по различным вариантам мероприятий, повышающих устойчивость к воздействию среды (различные покрытия, химико-термическая обработка, модификация поверхности и т. п.), различные варианты обработки поверхности (абразивная, лезвийная, электрохимическая и т. п.), различные варианты поверхностно-пластической деформации

(мероприятия, повышающие усталостную прочность). Свойства каждого материала можно вывести на экран (рис. 3).

Список рекомендуемых материалов				<u>Мероприятия, повышающие стойкость материала №1 к воздействию среды:</u>	
Место	Порядковый номер материала в БД	Сумма баллов	Материал	Радиопоглощающее покрытие	Гидрофобное нанопокрyтие
1	153	4.92	ВМЛ17-Т61	Антиабразивные покрытия	на основе полиуретановых и полимочевинных эластомеров
2	146	4.91	МЛ8-Т6	Оксидирование	
3	154	4.91	WE54(Англия)	Хромирование	
4	152	4.90	ВМЛ14-Т61	Никелирование	
5	149	4.89	ZK61(США)		

<u>Рекомендуемые режимы обработки поверхности:</u>		<u>Рекомендуемые варианты ППД:</u>	
- литьё в песчаные формы (Ra=100)	- точение/фрезерование (Ra=12.5 - 0.4)	- дробеструйная обработка	- виброшлифование
- обтачивание чистовое (Ra=20 - 1.25)	- шлифование предварительное (Ra=2.5 - 1.25)	- пневмодинамическая обработка	- галтовка
- электророзионная обработка (Ra=3.2 - 0.4)		- пескоструйная обработка	- гидрогалтовка
		- обработка роликами и шариками	- дронование
		- упрочнение микрошариками	- накатывание
		- выглаживание	- чеканка
		- алмазное выглаживание	
		- обработка механической щёткой	
		- виброупрочнение	

Рис. 2. Результаты подбора материала для входного устройства ТРДДФ см

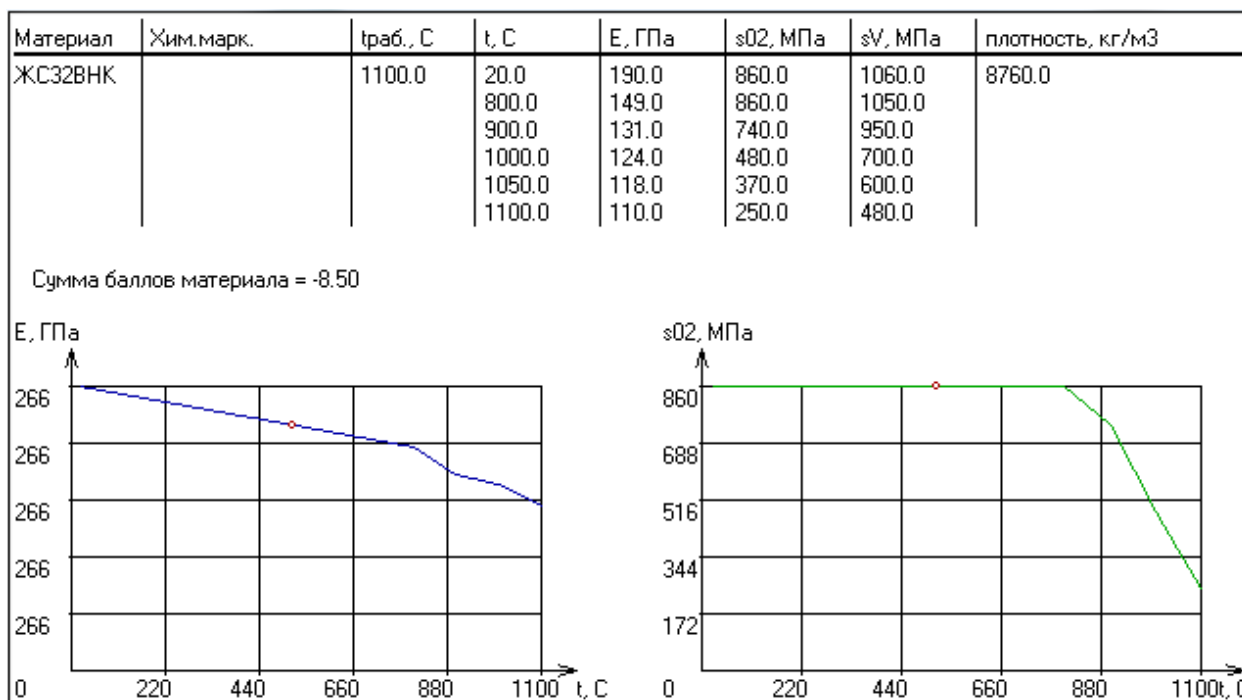


Рис. 3. Свойства материала

При моделировании деталей из КМ осуществляется последовательный перебор материала матрицы и материала волокна из БД, перебор коэффициента армирования. Каждому варианту материала назначаются баллы (по аналогии с металлическими материалами). Результат работы программы – список из пяти вариантов КМ, набравших максимальное количество баллов. При анализе деталей из КМ предполагается, что КМ

ортотропен (все волокна уложены в одном направлении, по направлению действия наибольших напряжений).

В элементах ЭС, в которых осуществляется подбор материалов для узлов двигателя, в которых происходит горение (основная камера сгорания, форсажная камера) осуществляется расчёт параметров в первичной зоне горения, оценка температур жаровой трубы и копуруса [6].

Для подбора материалов рабочих лопаток турбины и компрессора в ЭС используются СЭ прочностного анализа (см. рис. 1, СЭ 2, 6), в которых осуществляется распределение работ и КПД по ступеням, газодинамический расчёт по среднему диаметру и по высоте [2, 7], профилирование, расчёт статической прочности лопатки (определение действующих газовых и инерционных сил, моментов инерции профиля и т.д.), определение основных напряжений на хвостовике лопатки [8]. Для выполнения расчёта ЭС необходимо указать тип проточной части (закон профилирования: с постоянным наружным диаметром, с постоянным внутренним диаметром, с постоянным средним диаметром), количество ступеней (для компрессора также необходимо указывать количество сверхзвуковых ступеней), показатель степени при профилировании по высоте. Для рабочей лопатки турбины производится оценка температурного состояния пера лопатки с учётом работы системы охлаждения (конвективное, с дефлектором, конвективно-плёночное, пористое). При моделировании есть возможность учитывать воздействие на напряжения от инерционных сил антивибрационных полок (для рабочих лопаток компрессора) и бандажных полок (для рабочих лопаток турбин). На основании действующих напряжений и температур лопатки в различных по высоте сечениях элементами ЭС осуществляется анализ материалов из БД и назначение им баллов. Следует отметить, что материал рабочих лопаток влияет на конструкцию всего узла (от плотности материала лопатки зависят действующие инерционные нагрузки, от прочностных свойств материала лопатки и диска зависит толщина профиля и максимальное количество лопаток, которое можно разместить на диске).

В элементе ЭС для подбора материала выходного устройства осуществляется анализ температурного состояния основных элементов проточной части с учётом действия системы охлаждения (если оно предусмотрено конструкцией) и типа выходного устройства (сопло Лавалю, суживающееся сопло и сопло патрубков). Для температурного анализа принято, что для сопла Лавалю наиболее вероятно использование в конструкции двигателя форсажной камеры и использование охлаждаемых теплозащитных экранов; для суживающегося сопла вероятно использование как форсажной камеры с теплозащитными экранами (в схемах ТРДФ и ТРДДФ), так и наличие смесителя внутреннего и наружного

контуров без форсажной камеры и теплозащитных экранов (в схемах ТРДД), возможно также конструкции, в которых поток за турбиной напрямую проходит в выходное устройство без какой-либо системы охлаждения (в схемах ТРД); для выходного устройства типа сопло патрубков возможны конструкции с охлаждением стенок и без них.

Разработанная база данных и экспертная система предназначены для выполнения предварительного прочностного анализа, подбора пяти наиболее вероятных материалов, покрытий и других видов подготовки поверхности основных деталей и сборочных единиц проточного тракта авиационных двигателей. В результате использования разработанной ЭС и БД ещё на ранних стадиях проектирования авиационных ГТД появляется возможность оценить весовые характеристики изделия. Результаты работы ЭС должны уточняться на более поздних стадиях проектирования с уточнением термогазодинамических параметров в проточной части, действующих сил и конструкции.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.1848.

Список литературы

1. Ахмедзянов Д. А. Термогазодинамический анализ рабочих процессов ГТД в компьютерной среде DVIGw / Д. А. Ахмедзянов, И. А. Кривошеев, Х. С. Гумеров и др. – Уфа: УГАТУ, 2003. – 162 с.
2. Емин О. Н. Выбор параметров и газодинамический расчёт компрессоров и турбин авиационных ГТД: Учебное пособие / О. Н. Емин, В. Н. Карасев, Ю. А. Ржавин – М.: Дипак, 2003. – 156 с.
3. Кишалов А. Е. Обзор и анализ существующих баз данных и экспертных систем принятия решения по выбору материала основных элементов конструкции / А. Е. Кишалов, Ю. А. Шабельник, К. Е. Рожков, А. А. Шамсутдинов // Молодой ученый. – Чита, 2012. – Т. 1. – № 11 (46). – С. 49-52.
4. Кишалов А. Е. Покрытия и методы модификации поверхностей для повышения надёжности деталей ГТД / А. Е. Кишалов, Н. Ю. Дударева // Молодежный Вестник УГАТУ. Ежемесячный научный журнал № 4 (5). – Уфа: УГАТУ, 2012. – С. 43-49.
5. Кишалов А. Е. Экспертная система по выбору материала, покрытия и других видов подготовки поверхности элементов основных узлов авиационного ГТД / А. Е. Кишалов, Д. А. Ахмедзянов, К. В. Маркина // Молодежный Вестник УГАТУ. Ежемесячный научный журнал № 4 (5). – Уфа: УГАТУ, 2012. – С. 17-25.
6. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 566 с.

7. Холщевников К. В. Теория и расчёт авиационных лопаточных машин: Учебник для студентов вузов по специальности «Авиационные двигатели» / К. В. Холщевников, О. Н. Емин, В. Т. Митрохин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
8. Хронин Д. В. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей: Учебник для студентов вузов по специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки» / С. А. Вьюнов, Ю. И. Гусев, А. В. Карпов и др. / Под общ. ред. Д. В. Хрониной. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.

Рецензенты:

Бакиров Ф. Г., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой авиационной теплотехники и теплоэнергетики факультета авиационных двигателей, ФГБОУ ВПО УГАТУ, г. Уфа.

Целищев В. А., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной гидромеханики факультета авиационных двигателей ФГБОУ ВПО УГАТУ, г. Уфа.