

УДК 621.372

А.С. САМЕДОВ, Т.Б. УСУБАЛИЕВ

*Национальная академия авиации, Азербайджан***КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ВЫБОРА СОСТАВА ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ
ДЛЯ ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН**

Представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований по разработке математических моделей прогнозирования состава и получения новых композиций защитных покрытий лопаток газовых турбин на основе корреляционно-регрессионного анализа, анализа количественных соотношений и физико-химических характеристик с учетом атомного радиуса и типа кристаллической решетки элементов. Использован метод планирования эксперимента, на основе чего уточнено процентное содержание каждого выбранного элемента, выявлены диапазоны температур, время и количество опытов. Рентгенофазовым и термическим анализами исследованы фазовые превращения сплава нового состава, результаты которых подтвердили достоверность предлагаемого подхода.

газовые турбины, защитные покрытия, корреляционно-регрессионный анализ

Безопасность и эффективность эксплуатации самолетов гражданской авиации во многом определяются достижениями в области разработки высокоэкономичных двигателей с большими ресурсами и высокой надежностью. Новое поколение авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) отличается от существующих прототипов наиболее высокими значениями температуры газа (T_G^*) перед турбиной. Так, если T_G^* у двигателей IV поколения в среднем составляет 1600-1650К, то по прогнозам у АГТД V и VI поколений она возрастет до 1800 – 2000К и более [1, 2]. Однако это ведет к дальнейшему усложнению конструкции, увеличению термомеханической напряженности лопаток газовых турбин, надежность которых оказывает непосредственное влияние на надежность и ресурс АГТД в целом и безопасность полетов самолетов. В этой связи, разработка и внедрение высокоэффективных систем охлаждения, методов увеличения прочностных свойств, коррозионной стойкости сплавов, защитных покрытий и изделий являются важнейшими в решении проблемы долговечности газовых турбин.

Требования к материалам лопаток турбин характеризуются непрерывным повышением жаропрочности, сопротивлением термической и малоцикловой усталости, стойкости к воздействию газовой среды в условиях эксплуатации. На сегодняшний

день наиболее надежными и освоенными в мировой практике изготовления лопаток турбин являются сложные, многофазные жаропрочные сплавы на никелевой или кобальтовой основе типа ЖС, ВЖЛ, IN, TAZ, MAR, TRW, CMSX и др. [2]. Получение монокристаллической структуры с эффективной (заданной) кристаллографической ориентацией путем высокоградиентного литья лопаток с направленной кристаллизацией, применение дисперсных упрочняющих оксидов при выплавке металла, совершенствование технологии многокомпонентного легирования ведут к существенному повышению рабочей температуры и механических свойств сплавов.

Однако лопатки современных газовых турбин, работая при температурах порядка 1500°С, не могут эксплуатироваться в течение заданного ресурса без надежных высокотемпературных покрытий. Применяемые для лопаток АГТД жаропрочные никелевые сплавы в связи с их невысокой коррозионной стойкостью к продуктам сгорания не обеспечивают требования, предъявляемые к ресурсу лопаток. Поэтому улучшение эксплуатационных характеристик АГТД достигается за счет эффективных защитных покрытий. Защитные покрытия позволяют повысить качественные характеристики двигателей, уменьшить расход воздуха на охлаждение, сэкономить топливо, увеличить температуру газового потока на 100...150К. Именно покрытия дают возмож-

ность значительно увеличить срок использования лопаток и во многих случаях служат именно тем слоем, который принимает на себя разрушающее воздействие высоких температур и других факторов и в случае разрушения может быть нанесено заново. Долговечность покрытий зависит от их структуры, толщины, метода осаждения и качества нанесения.

Для обеспечения высокой надежности, защитные покрытия лопаток турбин должны удовлетворять требованиям, вытекающим из условий их эксплуатации: достаточная прочность и жаропрочность; высокая стойкость к газовой и сульфидной коррозии, термическая стабильность состава и структуры, высокая сопротивляемость термомеханическим циклическим нагрузкам, эрозионная стойкость, достаточная пластичность и вязкость разрушения, минимальная теплопроводность керамики, ремонтно-пригодность лопаток с керамическими покрытиями.

В табл. 1 приведены данные по химическому составу некоторых защитных покрытий [2, 3].

Достижение требуемого уровня работоспособности лопаточного аппарата ГТД связано с созданием работоспособной композиции «жаропрочный сплав - коррозионностойкое покрытие». Теоретическое обобщение и развитие представлений о введении легирующих элементов в сплавы покрытий, о влия-

нии новых элементов на характеристики структурной и фазовой стабильности, жаростойкости, термостойкости, на механические свойства жаропрочных сплавов имеет важное значение для проблемы увеличения долговечности турбинных лопаток современных ГТД. Поэтому исследования по установлению взаимосвязи химического состава и структуры сплавов с указанными свойствами является актуальной задачей, особенно для вновь разрабатываемых сплавов с учетом специфики их применения.

Экспериментальные методы синтеза состава новых сплавов отличаются трудоемкостью и требуют больших затрат времени и ресурсов. Достоверные значения коэффициентов диффузии для многокомпонентных многофазных сплавов, а также для новых систем «покрытие – основной сплав» как правило, не известны, что ограничивает применение расчетных методов.

Задача прогнозирования свойств и синтеза сплава особенно сложная и в настоящее время сформулированы лишь пути, на которых ожидается получение необходимой информации. Отсутствие надежного и экономичного метода прогнозирования состава и ресурса покрытий затрудняет определение допустимых сроков эксплуатации двигателя и снижает надежность лопаточного аппарата.

Таблица 1

Химический состав некоторых защитных покрытий лопаток современных газовых турбин

№	Наименование покрытия	Состав, %				
1	PWA 73	44,5 Ni	48,2 Al	6,5 Co	0,8 Cr	–
2	RT 22	35,0 Ni	42,8 Al	15,7 Pt	4,8 Co	1,8 Cr
3	SS82A	23,4 Ni	55,0 Al	13,3 Pt	3,7 Co	4,7 Cr
4	MDC 150L	48,8 Ni	40,1 Al	3,7 Pt	5,1 Co	2,2 Cr
5	СДП 3А	Co	22-24 Cr	11-13 Al	0,2-0,5 Y	–
6	СДП 6	Co	6-10 Ni	22-24 Cr	11-13 Al	0,3-0,5 Y
7	СДП 8	Co	0-2 Ni	25-28 Cr	9-11 Al	0,2-0,5 Y
8	СДП 11	Co	0-2 Ni	28-32 Cr	5-7 Al	0,3-0,5 Y
9	СДП 11А	Co	0-2 Ni	24-26 Cr	3,5-5,0 Al	0,3-0,6 Y
10	СДП 2	Ni	20,0 Cr	11,0 Al	Y	–
11	СДП 12	Co	20-25 Ni	22-24 Cr	9-11 Al	0,3-0,5 Y
12	СДП 13	18-20 Co	Ni	35-38 Cr	4-5 Al	0,2-0,5 Y
13	СДП 1	Ni	20 Co	20,0 Cr	11,0 Al	Y
14	СДП 3	Co	20,0 Cr	11,0 Al	Y	–
15	СДП 4	Ni	10 Co	20,0 Cr	11,0 Al	Y
16	ВСДП-11	Al	5,0 Si	1,5 Y	–	–
17	АТД-2	65Co	24Cr	13Al	0,35Y	–
18	АТД-4	67Co	21Cr	12Al	0,35Y	–
19	АТД-5	70Co	18Cr	11Al	0,4Y	–
20	АТД-6	72Co	18Cr	9Al	0,5Y	–
21	АТД-12	61Co	27Cr	11Al	0,3Y	–
22	АТД-14	65Co	30Cr	5Al	0,4Y	–

Таким образом, возникает необходимость в эффективных методах прогноза состава сплавов с необходимым комплексом свойств, который рационально сузит область поиска. Поиски новых высокотемпературных покрытий связаны, прежде всего, с оптимизацией химического состава новых композиций, с использованием принципиально новых физических эффектов, а также с разработкой и освоением новых технологических процессов и вновь создаваемых покрытий. В этой связи использован новый подход к проблеме прогнозирования свойств покрытий, опирающийся на возможности современных компьютерных технологий и применение различных методов идентификации. Для исследования структуры и физико-химических свойств сплавов, а также анализа возможности получения некоторых твердых растворов была собрана информация о различных микроскопических характеристиках элементов входящих в состав покрытий. Многие объемные свойства атомов элементов связаны с такими характеристиками, как радиус атомов, типы кристаллической решетки элементов, электронная конфигурация и расположение энергетических уровней атома, ионный радиус и электроотрицательность по Полингу, энергия ионизации атома и др. В среде пакета прикладных программ «STATISTICA» был собран банк данных, содержащий физико-химические характеристики более чем о 508 сплавах покрытий глубокой поиска более 50 лет, по состоянию на 2007 год [3]. На первом этапе проведен анализ состава сплава самого защитного покрытия и материала лопатки с точки зрения размерного фактора и типа кристаллической решетки. Выявлен металл, составлявший основу сплава (в %), его атомный радиус и тип кристаллической решетки. Определен размерной фактор, т.е. отличие радиусов атомов, входящих в сплав других элементов от основного элемента [4]:

$$R_{\max/\min} = R_{\text{осн.мет}} \pm 0,15R_{\text{осн.мет}}$$

Элементы, атомные радиусы которых лежат в интервале $R = R_{\min} \div R_{\max}$, будут составлять твердый раствор.

Из проведенного анализа химических составов сплавов и защитных покрытий лопаток газовых тур-

бин выявлены компоненты, которые при удовлетворении поставленных критериев могут входить в виде твердого раствора замещения в кристаллическую решетку сплава покрытия и самой лопатки, т.е. иметь улучшенную адгезию. При неудовлетворении требуемых критериев, элементы сплава будут образовывать сложную структуру, как твердый раствор внедрения или, чаще всего, чисто механическую смесь, что не будет способствовать термической и структурной стойкости покрытия.

Следовательно, для повышения эксплуатационной надежности покрытий следует добиваться двухсторонней диффузии, которая может быть достигнута при соблюдении размерного фактора, когда атомные радиусы элементов покрытия отличаются не более чем на 15% от радиусов атомов элементов покрываемого сплава, и если элементы покрытия и покрываемого сплава имеют одинаковый тип кристаллической решетки [4].

Таким образом, при математическом моделировании состава жаропрочного покрытия на первом этапе решалась проблема выбора факторов, определяющих растворимость друг в друге элементов и наиболее перспективных компонентов сплава для включения в математическую модель. С этой целью в базе данных «STATISTICA» был создан банк данных, содержащий физические характеристики атомов 23 элементов системы Менделеева, которые использованы в качестве параметров модели, разрабатываемый на следующем этапе. Предварительно были проанализированы фазы твердого раствора, сделаны прогноз и оценка качества эмпирических параметров.

При математическом моделировании влияния химического состава на жаропрочность была использована объемная модель, т.е. 23 – мерное пространство признаков. Отличительным признаком каждого сплава послужил его химический состав, т.е. процентное содержание каждого легирующего элемента, входящего в состав покрытия. Набор химических элементов принят за вектор признаков. Это позволило каждый сплав представить в пространстве признаков отдельной точкой [5].

Для решения поставленной задачи использован корреляционный анализ следующих элементов, входящих в состав сплавов: $x_1=\text{Co}$; $x_2=\text{Cr}$; $x_3=\text{Ni}$; $x_4=\text{Al}$; $x_5=\text{Y}$; $x_6=\text{Ta}$; $x_7=\text{W}$; $x_8=\text{Si}$; $x_9=\text{Hf}$; $x_{10}=\text{Mn}$; $x_{11}=\text{Mo}$; $x_{12}=\text{Ti}$; $x_{13}=\text{Zr}$; $x_{14}=\text{Pt}$; $x_{15}=\text{C}$; $x_{16}=\text{La}$; $x_{17}=\text{Re}$; $x_{18}=\text{Nb}$; $x_{19}=\text{Fe}$; $x_{20}=\text{V}$; $x_{21}=\text{Sn}$; $x_{22}=\text{Ru}$; $x_{23}=\text{Ir}$.

В результате корреляционного анализа были получены коэффициенты при парных взаимодействиях рассматриваемых элементов, которые приведены в табл. 2. Выводы о существенности линейных зависимостей между элементами покрытия были сделаны по оценкам значений коэффициентов корреляции. Анализ корреляционной таблицы показывает, что наиболее значимые связи существуют между x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_6 , x_7 , x_{12} , x_{14} , x_{22} . Следовательно, для состава модели сплава покрытия должны быть рассмотрены вышеперечисленные переменные. При этом ошибка, нормированная по теоретической оценке, составляла 0,015597. На основе регрессионного анализа построена многомерная линейная модель, в которой в качестве выходного параметра был принят x_1 ($x_1=y$):

$$y = 0,898582 - 0,518x_2 - 0,816x_3 - 0,815x_4 - 0,669x_6 - 0,193x_7 - 0,885x_{12} - 0,899x_{14} - 0,672x_{22}.$$

Проверка адекватности перечисленных моделей осуществлялась по коэффициентам детерминации и множественной корреляции, а также по критерию Фишера. Коэффициент детерминации для рассматриваемой модели составил $R=0,956$, коэффициент множественной корреляции $R=0,918$, значимый по критерию Фишера.

Такой подход позволил эффективно использовать корреляционно-регрессионный анализ по формированию состава и количественных соотношений элементов защитного покрытия в первом приближении, что было очень важно для планирования эксперимента до получения требуемого качества. На основе выбора элементов, имеющих наибольшие корреляционные связи с определением диапазонов их процентного содержания, анализа физико-химических характеристик с учетом атомного радиуса и типа кристаллической решетки получено новое высокотемпературное защитное покрытие для лопаток

газовых турбин авиационных двигателей следующего химического состава: Cr-Al- Pt- Me.

Достоверность полученных результатов была подтверждена экспериментальными исследованиями. Для проведения исследований использован метод планирования эксперимента, на основе чего были уточнены диапазоны процентного содержания каждого выбранного элемента, выявлены диапазоны температур, время и количество проводимых опытов. Применение метода планирования эксперимента при исследовании синтеза сплавов защитных покрытий позволило сократить время и материальные затраты.

Рентгенофазовым и термическим анализами исследованы фазовые превращения полученного сплава, результаты которых подтвердили корректность разработанного подхода с использованием корреляционно-регрессионного анализа.

Литература

1. Елисеев Ю.С. Перспективные технологии производства лопаток газотурбинных двигателей // Двигатель. – 2001. – №5 (17). – С. 4-8.
2. Елисеев Ю.С., Абраимов Н.В., Крымов В.В. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиационном двигателестроении. – М.: Высш. шк., 1999. – 291 с.
3. Самедов А.С., Усубалиев Т.Б. Тепловая защита авиационных газотурбинных двигателей. Научные основы выбора состава покрытий // Химические проблемы. – Баку: Институт химических проблем НАН Азербайджана, 2007. – № 3. – С. 436-443.
4. Пашаев А.М., Самедов А.С., Усубалиев Т.Б., Рзаев Т.Б., Ганбаров Д.М. Способ получения защитных покрытий на лопатках газовых турбин. / Патент АР № а 20070173, 2007.
5. Дерффель К. Статистика в аналитической химии – М.: Мир, 1994. – С. 159-183.

Поступила в редакцию 26.02.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф., академик А.М. Алиев, Институт химических проблем НАН Азербайджана, Баку.