Т. А. ИЛЬИНКОВА
С. Л. БАЛДАЕВ

ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ

В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

«Инфра-Инженерия»

УДК 621.431.75
ББК 39.55
И46

Рецензенты:
д-р техн. наук *В. А. Иванова*
(Ярославский государственный технический университет);
канд. техн. наук *С. А. Маньковский*
(ООО «НПО «Защитные покрытия»)

Ильинкова, Т. А.

И46 Защитные покрытия в авиадвигателестроении : учебное пособие / Т. А. Ильинкова, С. Л. Балдаев. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 160 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-2202-4

Рассмотрены материалы деталей различных узлов газотурбинных двигателей авиационного назначения и процессы, негативно воздействующие на них при эксплуатации; описаны технологические особенности процессов нанесения защитных покрытий, а также материалы для их создания. Излагаются теоретические вопросы формирования газотермических, вакуумно-конденсационных, диффузионных покрытий. Рассмотрены методы контроля качества порошковых материалов и покрытий, а также методы их исследования.

Для обучающихся по направлениям подготовки бакалавриата 13.03.03 «Энергетическое машиностроение», 15.03.01 «Машиностроение», 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», 24.03.04 «Авиастроение», 24.03.05 «Двигатели летательных аппаратов».

УДК 621.431.75
ББК 39.55

ISBN 978-5-9729-2202-4 © Ильинкова Т. А., Балдаев С. Л., 2025
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2025
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3
Раздел 1. МАТЕРИАЛЫ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ 4
Раздел 2. ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В МАШИНАХ И МЕХАНИЗМАХ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И НЕГАТИВНО ВЛИЯЮЩИЕ НА ИХ НАДЕЖНОСТЬ.....19
2.1. Трение и износ 19
2.2. Коррозия 26
Раздел 3. КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ..... 31
Раздел 4. ВИДЫ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ 35
4.1. Плазменное напыление 37
4.2. Газопламенное напыление.....44
4.3. Детонационное напыление 49
4.4. Подготовка поверхности детали к нанесению защитного покрытия.....54
Раздел 5. УПРАВЛЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЕМ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ И ИХ СВОЙСТВАМИ 62
Раздел 6. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ 76
6.1. Свойства металлических порошков и методы их контроля 83
Раздел 7. МЕТОДЫ ВАКУУМНОГО КОНДЕНСАЦИОННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ..... 93
7.1. Общая характеристика процессов и их классификация 93
7.2. Основные общие параметры вакуумного конденсационного напыления.....96
7.3. Параметры, характеризующие внешние условия напыления 99
7.4. Параметры потока напыляемых частиц 100
7.5. Конденсация испаренного материала в вакууме (способы PVD) 102
7.5.1. Испарение электронным лучом (EB-PVD) 103
7.5.2. Методы ионно-плазменного напыления 106
7.5.3. Магнетронное распыление 111
7.6. Химическое осаждение из газовой фазы (CVD).....112

Раздел 8. ДИФФУЗИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ 116
8.1. Основные закономерности диффузии 116
8.2. Химико-термическая обработка металлов и сплавов 121
8.2.1. Цементация.....122
Раздел 9. ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ В ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ..... 128
9.1. Жаростойкие покрытия.....128
9.2. Теплозащитные покрытия 134
9.3. Уплотнительные покрытия.....144
9.3.1. Составы уплотнительных покрытий 149
Список литературы..... 154

Раздел 1.
МАТЕРИАЛЫ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Газотурбинные двигатели (ГТД), широко используемые в авиации, можно разделить на следующие группы: турбореактивные (ТРД), турбовинтовые (ТВД) и промежуточные турбореактивные двухконтурные (ДТРД).

В настоящее время ТРД имеют вполне установившиеся элементы (рис. 1): входное устройство; компрессор; камеру сгорания; силовой корпус, связывающий турбину и компрессор; турбину; систему выхлопа; корпус приводов агрегатов; топливную, масляную и другие системы и агрегаты.

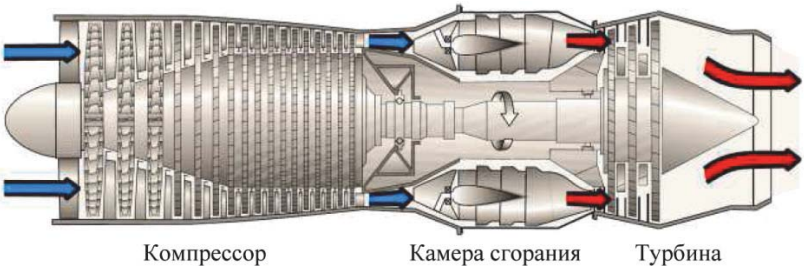


Рис. 1. Схема турбореактивного двухконтурного двигателя

Компрессор, камеру сгорания, турбину и реактивное сопло в ГТД располагают так, чтобы получить промежуточный тракт, при котором имеют место малые гидравлические потери. Газовые турбины для двигателей большой тяги применяются исключительно осевого типа.

К основным параметрам, характеризующим качественные технические показатели и степень совершенства ГТД, относятся: тяга, удельная масса двигателя, габаритные размеры, удельный расход топлива, ресурс и др. Авиационные двигатели работают в тяжелых условиях при эксплуатации в различных климатических зонах. Основные требования к материалам, используемым для

изготовления деталей ГТД: высокая удельная прочность, жаропрочность и жаростойкость, сопротивление коррозии, стабильность и воспроизводимость механических свойств, хорошая обрабатываемость современными методами заготовительного производства, размерной обработки, сварки и т. д.

Выбор материала для конкретных деталей узлов ГТД определяется, в первую очередь, температурой нагрева и силовым воздействием на детали двигателя при эксплуатации.

Поэтому при температуре менее 200 °С используются магниевые сплавы, при температуре около 250 °С – листовой дуралюмин; при температуре до 500 °С – коррозионностойкая сталь, титановые сплавы, при температуре выше 1000 °С – жаропрочные хромоникелевые сплавы. Некоторые материалы, применяемые в производстве авиационных ГТД, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Узел и требования к нему	Материалы для изготовления деталей узла (примеры)
1	2
Вентилятор (винт)	
Вентилятор: – диапазон рабочих температур 40...40 °С; – высокая прочность, малый вес; – безопасность при разрушении вентилятора, сопротивление воздействию ударов (столкновения с птицами и пр.)	Полимерные композиционные материалы или титановые сплавы. Предпочтительна слоистая структура материала
Детали вентилятора: – диапазон рабочих температур 200...300 °С; – высокие аэродинамические качества (всасывающее действие), компактность	Сплавы на никелевой основе, титановые сплавы, полимерные композиционные материалы

Продолжение таблицы 1

1	2
Компрессор	
Статорные и роторные лопатки: – диапазон рабочих температур 400...650 °С; – усталостная прочность, сопротивление эрозии	Титановые сплавы (ВТ-20, ВТ-9); Стали (1Х12Н9, Х15Н5Д2Т, 1Х17Н2, Х15Н5Д2Т); сплавы на никелевой основе (ЭП-517, ЭП-718ИД, ЖС6УВИ)
Диски: – диапазон рабочих температур > 400 °С; – высокая прочность; – сопротивление центробежным нагрузкам; – сопротивление усталости	Титановые сплавы (ВТ-9, ВТ-20)
Камера сгорания	
Жаровые трубы: – рабочая температура около 1550 °С; – сопротивление термическим ударам; – сопротивление окислению и газовой коррозии	Сплавы на никелевой основе (ЭИ-437Б, ЭИ-437Б-ВД, ЭИ437БУВД, ЭИ-435, ЭИ-607) с жаростойкими эмалями, теплозащитными покрытиями и облицовкой керамикой. В перспективе керамокомпозиты
Турбина	
Диапазон рабочих температур 550...1095 °С, прочность при центробежных и осевых нагрузках, жаропрочность, сопротивление ползучести, жаростойкость, сопротивление термическим ударам	Диски – сплавы на никелевой основе (ХН77ТЮРУ-ВД, (ЭИ437БУВД); ХН80ТБЮ (ЭИ-607); ХН62БМКТЮ-ПД). Лопатки – сплавы на никелевой основе: поликристаллические, с направленной кристаллизацией, монокристаллические (ЖС-3, ЖС6-К, ЖС6У-ВИ, ЖС6Ф-ВИ, ЖС-40, ЖС-30ВИ, ЖС-32) и жаростойкими и теплозащитными покрытиями

Окончание таблицы 1

1	2
Валы	
Диапазон рабочих температур 50...850 °С, высокая прочность и жаропрочность	Высокопрочные стали (15Х12Н2МВДАБ-Ш); сплавы на никелевой и железоникелевой основах
Сопло	
Диапазон рабочих температур 650...1300 °С, жаростойкость, сопротивление эрозионному воздействию газового потока	Сплавы на никелевой основе с жаростойкими и теплозащитными покрытиями, титановые сплавы, керамокомпозиты

Остановимся коротко на основных свойствах групп материалов, применяемых в основном производстве ГТД.

– *Стали* – наиболее изученные и широко применяемые конструкционные материалы современного машиностроения. В ГТД они используются для изготовления валов, зубчатых колес и деталей агрегатов, а также кольцевых деталей корпусов компрессора и турбины. В авиационном двигателестроении в основном используются легированные стали с $\sigma_в > 900$ МПа. Широкое применение получили стали, упрочняемые термической и химико-термической обработкой. Основные группы сталей, используемых в производстве ГТД, приведены в табл. 2.

– *Титановые сплавы* – важнейшие конструкционные материалы, широко применяемые в авиационной и космической технике, судостроении, химической промышленности и других отраслях. По разработке и производству титановых сплавов Россия занимает лидирующее место в мире. Титановые сплавы характеризуются высокой прочностью и вязкостью при низком удельном весе (4,51 г/см^3), коррозионной стойкостью в большинстве самых агрессивных сред (азотная и серная кислота, царская водка, сероводород, морская вода, влажная морская атмосфера и др.). Кроме того, они сравнительно хорошо поддаются традиционным способам литья, сварки, механической обработки. Недостатки титановых сплавов:

Таблица 2

Марки сталей	Термическая обработка	Механические свойства	Максимальная рабочая температура, °С	Назначение, технологические свойства
1	2	3	4	5
Среднелегированные хромоникелевые стали*				
12ХН3А, 12Х2Н4А, 18Х2Н4ВА, 16ХЗНВФМБ, 12Х2НВФА и др.	Цементация 900–950 °С, закалка в масло, обработка холодом при –70 °С, низкий отпуск при 150–350 °С	$\sigma_в$ = 950–1100 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 700–900 МПа, δ = 12–15 %, KCU = 0,7–1,2 МДж/м^2	–	Изготовление шестерен, валов, цапф, муфт, рессор, осей и др.
Коррозионностойкие стали аустенитного класса				
12Х18Н9, 12Х18Н10Т, 12Х17Г9АН4	Закалка в воду с 1050–1100 °С	$\sigma_в$ = 650–700 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 280–390 МПа, δ = 45–69 %, KCU = 1,3–3,0 МДж/м^2	350 800 400	В качестве листовых материалов, деталей крепежа и др.

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
Коррозионностойкие стали аустенитно-мартенситного класса				
08Х17Н5М3, 1Х15Н4АМ3	Закалка на воздухе с 950 °С и обработка холодом –70 °С 2 ч	$\sigma_в$ = 1200–1500 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 850–1100 МПа, δ = 12–15 %, KCU = 0,1–0,5 МДж/м^2	450–500	Для изготовления сварных узлов в качестве листовых материалов, обшивки и др.
Коррозионностойкие мартенситно-стареющие стали				
Х15Н5Д2Т, 06Х14Н6Д2МБТ	Закалка с 950 °С и старение при 450 °С 1 ч	$\sigma_в$ = 1250–1400 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 1100–1250 МПа, δ = 9–11 %, KCU = 0,9–1,0 МДж/м^2	300	Для изготовления сварных узлов силовых деталей конструкции самолета и двигателя топливных баков и др.
Подшипниковые стали				
ШХ15, ШХ15СГ 8Х4В8Ф2	Закалка в масло с 840 °С, отпуск 160–170 °С Закалка в масло с 1230 °С, отпуск 560 °С	HRC = 60...65 HRC = 60...65	170 50	Крупногабаритные нагруженные подшипники, работающие при температурах до 450 °С, изготавливаются из стали 8Х4В8Ф2

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5
Жаропрочные стали мартенситного класса				
13Х11Н2В2МФ, 15Х12Н2М2ВФ АБ, 14Х16Н2М2К5Ф АБ	Закалка в масло с 1010–1130 °С и отпуск 600–690 °С	$\sigma_в$ = 1000–1150 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 850–1050 МПа, δ = 11–12 %, KCU = 0,6–1,0 МДж/м^2	600 °С	Для изготовления нагруженных деталей авиационных двигателей: лопаток, дисков, валов компрессоров, болтов, осей шпилек и др.

Примечание. *Детали из этих сталей обычно упрочняются цементацией или азотированием.

– склонность к солевой коррозии под напряжением при повышенных температурах (215–550 °С);

– активное взаимодействие с газами при повышенных (начиная с 400 °С) температурах, что приводит к увеличению хрупкости и потере термической стабильности;

– водородная хрупкость, которая проявляется при ударных и длительных статических нагрузках;

– низкие антифрикционные свойства и износостойкость из-за отсутствия граничной смазочной пленки, препятствующей прямому контакту материалов при трении. Схватывание и задирообразование наблюдается при минимальных контактных нагрузках.

Применение титановых сплавов также ограничивается из-за низкого модуля упругости (почти в два раза более низкий ($9{,}85 \cdot 10^4 ... 10{,}9 \cdot 10^4$ МПа, чем у стали).

Титановые сплавы принято делить на пять групп:

1) α-сплавы (ВТ 1-00, ВТ 1-0, ВТ5, ВТ5-1);

2) псевдо-α-сплавы (ОТ4-0, ОТ4-1, ВТ4, ОТ4-2, ВТ18, ВТ20);

3) (α + β)-сплавы (ВТ6, ВТ3-1, ВТ8, ВТ9, ВТ 14, ВТ 16, ВГ23, ВТ33);

4) (α + β)-сплавы переходного класса (ВТ22, ВТ30);

5) β-сплавы (ВТ15, ВТ32, 4210 (67 % Ti + 33 % Mo).

При термической обработке α-сплавы и псевдо-α-сплавы не упрочняются и их применяют в отожженном состоянии; (α + β)-сплавы и β-сплавы при термической обработке (закалка + старение) упрочняются по мартенситному типу. Максимальный эффект термической обработки достигается для (α + β)-сплавов переходного класса.

По способу получения заготовок титановые сплавы разделяют на деформируемые и литейные. Деформируемые сплавы дополнительно делят на сплавы повышенной пластичности ВТ 1-0, ОТ4-0, ОТ4-1 ($\delta > 20$ %, $\sigma_в < 600$ МПа); сплавы средней прочности ВТ5-1, ВТ4, ВТ 16, ВТ20 ($\sigma_в = 600$–1000 МПа); высокопрочные титановые сплавы ВТ14, ВТ22, ВТ23, ВТ15 ($\sigma_в = 1000$–1500 МПа); жаропрочные титановые сплавы ВТ3-1, ВТ9, ВТ18, ВТ25 ($\sigma_в = 1000$–1500 МПа). Свойства некоторых титано-

вых сплавов и возможные области их применения приведены в табл. 3.

Таблица 3

Сплав	Термическая обработка	Механические свойства	Область применения
ОТ4-0 α-сплав	Отжиг при 650 °С	$\sigma_в$ = 440–635 МПа, δ = 20 %, KCU = 500–700 кДж/м^2	Для изготовления сварных деталей сложной формы
ВТ20 псевдо-α-сплав	Отжиг при 750 °С	$\sigma_в$ = 885–930 МПа, δ = 8–10 %, KCU = 400 кДж/м^2	Детали, длительно работающие до 500 °С (до 3000 ч)
ВТ18У псевдо-α-сплав	Отжиг при 950 °С	σ = 930 – ИЗО МПа, δ = 13 %, KCU = 400 кДж/м^2	Диски компрессоров, длительно работающие при 550–600 °С
ВТ6 (α + β)-сплав	Закалка с 850–930 °С, старение при 450–600 °С 2–6 ч	$\sigma_в$ = 960–1170 МПа δ = 20 %, KCU = 250–300 кДж/м^2	Наиболее широко применяемый и универсальный титановый сплав
ВТ9 (α + β)-сплав	Закалка с 920–940 °С, старение при 500–600 °С ... 6 ч	σ. = 1125–1275 МПа, δ = 7–9 %, KCU = 300 кДж/м^2	Диски и лопатки осевых компрессоров ГТД
ВТ16 (α + β)-сплав	Закалка с 780–830 °С, старение при 560–580 °С ... 6 ч	$\sigma_в$ = 890–1100 МПа, δ = 20 %, KCU = 500–700 кДж/м^2	Детали крепежа (болты, заклепки и др.), в том числе с накатанными резьбами

Окончание таблицы 3

Сплав	Термическая обработка	Механические свойства	Область применения
ВТ25У ($\alpha + \beta$)-сплав	Двойной отжиг 960 °С 3 ч и 550 °С 6 ч	$\sigma_в$ = 1160 МПа, δ = 13 %, KCU = 300–400 кДж/м^2	Диски и лопатки осевых компрессоров ГТД
ВТ22 сплав переходного класса	Закалка с 720–780 °С, старение при 480–600 °С 4...10 ч	$\sigma_в$ = 1150–1450 МПа, δ = 6–7 %, KCU = 180–200 кДж/м^2	Высоконагруженные детали, работающие при температурах 350–400 °С
ВТ35 псевдо-β-сплав	Закалка с 780–820 °С, старение при 500–550 °С 4–6 ч	$\sigma_в$ = 830–1275 МПа, δ = 4–18 %, KCU = 500–700 кДж/м^2	Детали из листовых материалов, крепеж

Никелевые сплавы, обладающие одновременно высокой жаропрочностью и жаростойкостью, содержат в определенных сочетаниях большое количество легирующих элементов (Ni, Co, Fe, Ti, Cr, Zr, V, Nb, Mo, Ta, W, Re и др.) и являются высоколегированными. Количество вводимых элементов составляет от 10 до 15. Легирующие элементы в никелевых сплавах могут быть разделены на несколько категорий:

– элементы, образующие с никелем твердые растворы, упрочняющие матричную γ-фазу (Co, Cr, Mo, W, Fe);

– элементы, образующие с никелем интерметаллидные соединения – γ'-фазу (Ni_3Al, Ti, Nb, Ta, Hf);

– элементы, образующие карбидные соединения (Cr, Mo, W, Nb, Ta, Ti);

– элементы, улучшающие литейные свойства, свариваемость, деформируемость и т. д. (C, V);

– элементы, рафинирующие сплав и способствующие формированию мелкозернистой структуры (B, Zr, Hf, Y, редкоземельные элементы).

Основные фазы, присутствующие в никелевых сплавах:

– γ′-фаза – основная упрочняющая фаза никелевых сплавов типа $Ni_3(Al, Ti)$, когерентно связана с γ-фазой. Интересно, что предел текучести γ′-фазы увеличивается с ростом температуры, начиная с 650 °С. γ′-фаза является достаточно вязкой, что придает сплаву жаростойкость и прочность без охрупчивания материала. С увеличением объемной доли γ′-фазы повышается жаростойкость. В современных сплавах доля γ′-фазы достигает 70 %. Имеется множество факторов, определяющих упрочняющий эффект γ′-фазы, – это размер ее частиц, содержание легирующих элементов, объемная доля и т. д.;

– карбидные фазы. Содержание углерода в никелевых сплавах составляет 0,05...0,2 %. При его взаимодействии с карбидообразующими элементами формируются карбиды типа TiC, TaC или HfC. При последующей термической обработке эти исходные карбиды преобразуются в формы с меньшим содержанием углерода – $Me_{23}C_6$ и Me_6C. Они имеют тенденцию к выделению на границах зерен, результатом чего является увеличение прочности на растяжение при высоких температурах;

– топологические плотноупакованные фазы (ТПУ-фазы) – σ-фаза, μ-фаза, фазы Лавеса. Эти фазы в отличие от γ′ выделяются в форме пластин, что негативно сказывается на механических свойствах никелевых сплавов – в частности вязкости и сопротивлении ползучести, и способствуют инициированию трещин вследствие своей хрупкости.

Сплавы на никелевой основе подразделяют на деформируемые (обрабатываемые давлением) и литейные.

Деформируемые сплавы являются поликристаллическими, эксплуатируются при температурах порядка 850 °С, что составляет чуть больше, чем $0{,}7T_{пл}$ (1280 °С).

Литейные сплавы используются для изготовления наиболее нагруженных деталей ГТД – сопловых и рабочих лопаток турбины. Их изготовляют направленной кристаллизацией или монолитьем. Рабочие температуры эксплуатации таких сплавов

составляет 0,80–0,9$T_{пл}$. В табл. 4 представлены некоторые никелевые сплавы разработки ВИАМ и их характеристики.

Современные никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток ГТД достигли предела рабочих температур 1100...1150 °С, что составляет 80...85 % их температуры плавления. Эволюционное развитие жаропрочных никелевых сплавов привело к созданию сплавов I, II, III, IV и V поколений, температура плавления которых повышалась за счет легирования тугоплавкими элементами вольфрамом, рением и рутением, достигнув 1350...1370 °С.

Таблица 4

Группа сплавов	Термическая обработка	Механические свойства. Длительная прочность, σ_{40}^{975}, МПа, не менее	Рабочая температура, °С
Жаростойкие никелевые сплавы для изготовления основной и форсажной камер сгорания и др.			
ХН60ВТ, ХН50ВМТЮБ, ХН68ВМТЮК	Закалка в масло с 1100–1140 °С + старение 900 °С 5 ч	$\sigma_в$ = 220–300 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 50–80 МПа, δ = 17–32 % (при 900 °С)	До 1000
Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток газовых турбин (деформируемые)			
ЭП109, ЭП220, ЖС6КП	Закалка с 1220–1230 °С (3–5 ч) + старение 950 °С 2 ч	$\sigma_в$ = 650 МПа, δ = 6 % $\sigma_в$ = 750 МПа, δ = 6 % (при 900 °С)	До 950
Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток газовых турбин (для равноосного литья)			
ЖС6У, ЖС6Ф-НК, ВЖЛ12У-ВИ ЖС6К	Закалка с 1220–1230 °С (3–5 ч) + старение 950 °С 2 ч	$\sigma_в$ = 800 МПа, δ = 5 % $\sigma_в$ = 850 МПа, δ = 12 % $\sigma_в$ = 780 МПа, δ = 5 % (при 900 °С)	1050 – 1000 –