

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»**

Кафедра авиационных двигателей

МАТЕРИАЛЫ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**Учебный справочник
по дисциплине «Конструкция и проектирование
авиационных двигателей и энергетических установок»**



Уфа 2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

Кафедра авиационных двигателей

МАТЕРИАЛЫ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Учебный справочник
по дисциплине «Конструкция и проектирование
авиационных двигателей и энергетических установок»

Уфа 2021

Авторы-составители: В. Ф. Харитонов, П. В. Соловьев

УДК 621.452(07)

ББК 39.55я7

Материалы деталей авиационных двигателей : учебный справочник по дисциплине «Конструкция и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т ; авт.-сост. : В. Ф. Харитонов, П. В. Соловьев. – Уфа : УГАТУ, 2021. – 80 с.

Рассматриваются физико-механические и технологические свойства металлических, керамических и композиционных материалов для деталей авиационных двигателей, даются рекомендации по их применению.

Предназначен для студентов, обучающихся по специальности 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей. Может быть использован студентами, обучающимися по направлению подготовки бакалавров 24.03.05 Двигатели летательных аппаратов.

Рецензент канд. техн. наук, доцент Б. К. Галимханов

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Магниевого сплавы	7
2. Алюминиевые сплавы	8
3. Конструкционные стали	12
4. Медные сплавы	15
5. Титановые сплавы	19
6. Коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные стали	23
7. Сплавы на основе никеля и хрома	27
7.1. Жаростойкие сплавы на никелевой основе	27
7.2. Сплавы на основе хрома	29
7.3. Жаропрочные литейные сплавы на никелевой основе	30
7.4. Жаропрочные деформируемые сплавы на никелевой основе ...	33
8. Интерметаллидные материалы	38
9. Керамические материалы	40
9.1. Состав и физико-механические свойства керамических материалов	40
9.2. Применение керамических материалов в горячих узлах и опорах ГТД	42
10. Композиционные материалы	42
10.1. Определение, свойства, классификация	42
10.2. Прогнозирование механических характеристик композитов композиционных материалов	46
10.3. Применение композиционных материалов	51
Заключение	54
Список литературы	55
Условные сокращения обозначения	56
Приложение	59

ВВЕДЕНИЕ

В учебном справочнике приведены основные сведения по технологическим, физико-механическим свойствам материалов для деталей авиационных двигателей и рекомендации по их применению.

В соответствии с ФГОС по специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» (уровень специалиста). Минобрнауки РФ, утв. Приказом №141 16.02.2017 выпускник, в числе других, должен обладать следующими профессиональными и профессионально-специализированными компетенциями, связанными с использованием знаний, умений и навыков в области применения материалов при проектировании АД и ЭУ (для специализации №1 «Проектирование авиационных двигателей и энергетических установок») (табл. 1).

Таблица 1

Компетенции, требующие знания, умения и навыки в области материалов АД

№	Формируемые компетенции	Код
1	Способность принимать участие в работах по расчету и конструированию отдельных деталей и узлов двигателей и энергетических установок ЛА в соответствии с техническими заданиями и использованием стандартных средств автоматизации проектирования	ПК-1
2	Способность выбирать основные и вспомогательные материалы, используемые при изготовлении авиационных и ракетных двигателей и энергоустановок ЛА	ПК-11
3	Способность выполнять расчеты параметров рабочего процесса, нагруженности, теплового состояния и характеристик авиационных двигателей, их узлов и элементов	ПСК-1.1
4	Способность выполнять прочностные расчеты и осуществлять конструирование деталей, узлов и элементов авиационных двигателей	ПСК-1.2
5	Способность выбирать основные и вспомогательные материалы, используемые при изготовлении авиационных двигателей, их узлов и элементов	ПСК-1.7

Знание свойств материалов необходимы для проведения прочностных, тепловых и весовых расчетов элементов АД, а также для рационального выбора материала той или иной детали при ее проектировании, исходя из требований надежности и условий эксплуатации.

Учебный справочник может быть использован студентами IV, V и VI курсов специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» при выполнении курсового проекта по дисциплине «Конструкция и проектирование АД и ЭУ» и выпускной квалификационной работы.

Учебный справочник состоит из десяти разделов. В каждом разделе рассматривается определенная группа материалов. Раздел начинается общей характеристикой материалов данной группы. Затем идет описание свойств конкретных материалов. Для сокращения объема описание свойств выполнено по следующей схеме:

1 – общая характеристика материала, особенности его химического состава;

2 – технологические свойства (преимущественный способ получения полуфабрикатов, обрабатываемость резанием, свариваемость, способы упрочнения и т.д.);

3 – данные по применению материала (для изготовления каких деталей используется);

4 – максимальная температура применения.

Физико-механические свойства (пределы прочности, модуль упругости, коэффициенты теплопроводности и др.) материалов данной группы сведены в таблицы, которые помещены в приложении.

Для ряда материалов данные по пределам длительной прочности приведены в зависимости от параметра Ларсона-Миллера P , определяемого как

$$P = (t + 273)(\lg \tau + 20),$$

где t – температура детали, °С; τ – время работы, час.

Химические элементы в марках сплавов обозначены следующими буквами: А – азот; Б – ниобий; В – вольфрам; Г – марганец; Д – медь; Л – бериллий; М – молибден; Н – никель; Р – бор; С – кремний; Т – титан; Ф – ванадий; Ю – алюминий; К – кобальт; Х – хром; Ц – цирконий.

Обозначение марок сплавов.

1. Наименование по ГОСТу марок сталей и некоторых сплавов состоит из обозначения элементов и следующих за ними цифр. Цифры, стоящие после букв, указывают среднее количество

легирующего элемента в целых единицах, кроме элементов, присутствующих в сплаве в малых количествах. Цифры перед буквенным обозначением указывают среднее или максимальное содержание углерода в стали в сотых долях процента. Химические элементы в марках обозначены следующими буквами:

В – вольфрам;	Г – марганец;	М – молибден;
Н – никель;	С – кремний;	Ф – ванадий;
Х – хром;	Ю – алюминий;	

Например, сталь 16Х11Н2В2МФ содержит в среднем 0,16% углерода, 11% хрома, 2% никеля, 2% вольфрама менее 1% молибдена и ванадия.

2. Стали и сплавы, полученные специальными методами, дополнительно обозначаются через тире в конце наименования марки буквами: ВД – вакуумно-дуговой переплав, ИД – индукционно-дуговой переплав, Ш – электрошлаковый переплав, ВИ – вакуумно-индукционная выплавка, П – порошковый, НК – направленная кристаллизация. Например, ХН77ТЮР-ВД.

3. Нестандартные наименования марок сплавов состоят из букв и цифр. Одна из букв соответствует основе сплава (ВТ – титановый сплав), другая может указывать на способ изготовления полуфабрикатов: Л – литье Д – деформирование (ВТ5-Л – титановый литейный сплав). Следующие за буквами цифры означают обычно порядковый номер разработки сплавов данного типа. Например, ВТ1-0, ОТ4, ВТ18.

4. Обозначение марок магниевых и алюминиевых сплавов состоит, чаще всего, из двух букв и цифр. Одна из букв соответствует основе сплава (М – магниевый, А – алюминиевый), другая может указывать на способ изготовления полуфабрикатов (Л – литье, К –ковка). Следующие за буквами цифры означают обычно порядковый номер разработки сплавов данного типа (например, МЛ9, АК6).

5. Обозначение сплавов на основе меди начинается с букв Бр (бронзы) или Л (латуни). Далее указываются элементы, входящие в состав сплава (А – алюминий, Ж – железо, Мц – марганец и др.), и числа, указывающие среднее содержание этих элементов в процентах (в случае латуней первые две цифры показывают содержание меди в процентах). Например, бронза БрАЖ9-4 содержит в среднем 9% алюминия и 4% железа.

1. МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Для магниевых сплавов характерны следующие особенности:

- а) малая плотность ($\rho \approx 1800 \text{ кг/м}^3$);
- б) невысокая коррозионная стойкость;
- в) низкая сопротивляемость ударному и знакопеременному нагружению;
- г) низкая пластичность в горячем и холодном состояний;
- д) повышенная жароопасность, так как магниевая пыль и стружка легко воспламеняются;
- е) очень хорошая обрабатываемость резанием;

По удельной прочности ($\sigma_{\text{в}} / \rho$) многие магниевые сплавы не уступают легированным сталям и алюминиевым сплавам. Все сплавы магния делятся на деформируемые и литейные. Литейные сплавы применяются для изготовления корпусов агрегатов, корпусов опор ГТД и др. аналогичных элементов.

Значение коэффициента термического расширения магниевых сплавов составляет в среднем $24 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$, коэффициента теплопроводности – $155 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ при температуре 20°C .

МЛ5

1. Высокопрочный литейный сплав, легированный алюминием (8%), марганцем, цинком.

2. Литье в песчаные и оболочковые формы, в кокиль, по выплавляемым моделям, под давлением. Удовлетворительно сваривается аргоно-дуговой сваркой.

3. Корпуса агрегатов, клапанов, опор.

4. $t_{\text{max}} = 150\text{--}200^\circ\text{C}$.

МЛ15

1. Высокопрочный литейный сплав, легированный цинком (4,5%), цирконием и лантаном (по 0,9%).

2. Литье в песчаные формы, кокиль, по выплавляемым моделям. Обладает повышенной герметичностью, хорошо сваривается аргоно-дуговой сваркой. Более жаропрочен, чем сплав МЛ5.

3. Сложные крупногабаритные детали, работающие при высоком внутреннем давлении.

4. t_{max} от 200°C (длительно) до 350°C (кратковременно).

МЛ9

1. Жаропрочный литейный сплав, легированный неодимом (2,2%), цирконием и индием.
2. Литье в песчаные формы и кокиль. Удовлетворительно сваривается аргоно-дуговой сваркой.
3. Корпусные детали.
4. $t_{\max} = 300\text{--}400^\circ\text{C}$.

МЛ10

1. Жаропрочный литейный сплав, легированный неодимом (2,5%) и цирконием.
2. Литье в кокиль и песчаные, формы. Хорошо сваривается аргоно-дуговой сваркой.
3. Нагруженные детали высокой герметичности, детали с высокой стабильностью размеров.
4. $t_{\max} = 250\text{--}350^\circ\text{C}$.

МА8

1. Деформируемый сплав средней прочности легированный марганцем (1,8%) и церием.
2. Полуфабрикаты – полосы, трубы, прутки. Хорошо сваривается аргоно-дуговой сваркой. Обладает повышенной коррозионной стойкостью.
3. Профили и трубы для изготовления деталей арматуры топливных и масляных систем.
4. $t_{\max} = 200\text{--}250^\circ\text{C}$.

Физико-механические свойства магниевых сплавов приведены в прил., табл. П.1.

2. АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Алюминиевые сплавы обладают следующими особенностями:

- 1) сравнительно низкая плотность ($\rho \approx 2700 \text{ кг/м}^3$);
- 2) низкая сопротивляемость ударному и знакопеременному нагружению;
- 3) высокая пластичность в горячем и холодном состоянии;
- 4) плохая обрабатываемость резанием;

- 5) хорошая свариваемость газовой и контактной сваркой;
- 6) температура плавления алюминия 660°C;
- 7) низкие литейные свойства.

Максимальная температура применения не превышает 350°C.

Различают деформируемые и литейные сплавы. Из деформируемых сплавов в авиадвигателестроении применяются следующие: жаропрочный дуралюмин ВД-7, ковочные сплавы АК6, АК6-1, АН4, АК4-1 и сплав высокой пластичности Амгб. Сплавы этой группы (кроме Амгб) обрабатывают давлением в горячем состоянии, а затем подвергают упрочняющей термической обработке.

К литейным сплавам, не обрабатываемым давлением, но упрочняемым термической обработкой, относятся: сплавы высокой герметичности (АЛ4, АЛ4М, АЛ9, ВАЛ5) и жаропрочные (АЛ5, АЛ19, АЛ21, ВАЛ1).

АЛ4М

1. Литейный сплав высокой герметичности с повышенной жаропрочностью, легированный кремнием (9,5%), медью (2%), магнием, титаном, бором.

2. Хорошо обрабатывается резанием. Литье в кокиль и песчаные формы.

3. Корпуса компрессоров и агрегатов, фланцы, крышки, арматура.

4. $t_{\max} = 250^{\circ}\text{C}$.

АЛ9

1. Литейный сплав высокой герметичности, легированный кремнием (7%), магнием и марганцем.

2. Плохо обрабатывается резанием. Литье в песчаные и оболочковые формы, по выплавляемым моделям, в кокиль, под давлением.

3. Тонкостенные и сложные отливки (корпуса насосов, крышки, фланца и т.д.).

4. $t_{\max} = 180^{\circ}\text{C}$.

ВАЛ5

1. Высокопрочный литейный герметичный сплав, легированный кремнием (7,5%), магнием, бериллием и титаном.

2. Хорошо сваривается аргоно-дуговой сваркой. Литье в песчаные формы, в кокиль.

3. Нагруженные и сложные по конфигурации крупные корпусные детали, работающие под большим внутренним давлением.

4. $t_{\max} = 200^{\circ}\text{C}$.

АЛ5

1. Жаропрочный литейный сплав, легированный кремнием (5%), медью (1,3%), магнием.

2. Литье в кокиль, в песчаные и оболочковые формы, по выплавляемым моделям. Хорошо обрабатывается резанием, удовлетворительно сваривается аргоно-дуговой сваркой.

3. Средненагруженные детали (корпуса приводов, опор, детали, топливной аппаратуры и т.д.).

4. $t_{\max} = 250\text{--}300^{\circ}\text{C}$.

АЛ19

1. Жаропрочный литейный сплав, легированный медью (5%), марганцем и титаном

2. Имеет удовлетворительные литейные свойства. Литье в кокиль, в песчаные и оболочковые формы. Хорошо обрабатывается резанием хорошо сваривается аргоно-дуговой и газовой сваркой.

3. Средненагруженные детали, работающие при повышенных температурах. Силовые детали, работающие при комнатной температуре и высоком уровне вибрации.

4. $t_{\max} = 300^{\circ}\text{C}$.

ВАЛ1

1. Жаропрочный литейный сплав, легированный медью (6%), никелем (1%), марганцем, церием, цирконием.

2. Литье в кокиль и песчаные формы. Хорошо обрабатывается резанием.

3. Детали, армированные стальными трубками и втулками.

4. $t_{\max} = 350^{\circ}\text{C}$.

АМг6

1. Высокопластичный термически неупрочняемый сплав, легированный магнием (6%).
2. Хорошо штампуется в холодном состоянии, хорошо сваривается.
3. Бензо- и маслобаки, трубопроводы, кожухи.
4. $t_{\max} = 100^{\circ}\text{C}$.

АК4, АК4-1

1. Жаропрочный ковочный сплав, легированный медью (2,2%), магнием (1,6%), никелем (1,3%), железом (1,3%), кремнием (0,8%), для сплава АК4-1 – 0,35%).
2. Полуфабрикаты – штамповки, поковки, прессованные прутки и плита. Сплав АК4-1 пластичнее в горячем состоянии, чем сплав АК4.
3. Крыльчатки, штампованные детали входных: устройств, лопатки и диски компрессоров, поршни.
4. $t_{\max} = 300\text{--}350^{\circ}\text{C}$.

АК6, АК6-1

1. Ковочный сплав, легированный медью (2,2%), магнием, марганцем и кремнием. Сплав АК6-1 дополнительно легируется титаном и хромом.
2. Хорошо деформируется в горячем и холодном состоянии. Сваривается контактной сваркой. Сплав АК6-1 пластичнее, чем АК6.
3. Крыльчатки и диски компрессоров, кольца диффузоров.
4. $t_{\max} = 100^{\circ}\text{C}$.

ВД17

1. Деформируемый сплав, легированный медью(3%), магнием (2,2%), марганцем.
2. Детали изготовляют штамповкой или резанием прессованных полос.
3. Рабочие и спрямляющие лопатки компрессоров.
4. $t_{\max} = 250^{\circ}\text{C}$.

Физико-механические характеристики алюминиевых сплавов даны в прил., табл. П.2. Среднее значение коэффициента линейного

расширения алюминиевых сплавов составляет $(20-22) \cdot 10^{-6}$ 1/К, коэффициента теплопроводности – 160–200 Вт/м·К при температуре 20°C.

3. КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

Все конструкционные стали, применяемые в авиастроении, можно разделить на пять групп: цементуемые, азотируемые, улучшаемые, высокопрочные, пружинные.

Упрочнение поверхностных слоев деталей химико-термической обработкой (цементация, азотирование) является эффективным средством повышения их выносливости и износостойкости, термоулучшения (закалка с последующим высоким отпуском) применяется для получения структуры стали, сочетающей высокую вязкость с достаточно большой прочностью. Улучшаемые стали используются для изготовления ответственных тяжело нагруженных деталей. Для повышения коррозионной стойкости цементированные и азотированные детали, предназначенные для работы в масле и топливе, защищаются оксидно-фосфатными покрытиями.

Высокопрочные стали термообработывают на σ_v более 1400 МН/м². Для повышения долговечности деталей из этих сплавов при переменных нагрузках применяют поверхностное упрочнение методами пластического деформирования (обкатка, выглаживание, дробеструйная обработка и др.).

Пружинные стали термообработывают на HRC 44–48. При более высокой твердости повышается чувствительность к концентрации напряжений.

Физические характеристики конструкционных сталей лежат на следующих пределах:

- плотность 7650–7850 кг/м³;
- коэффициент теплопроводности 35–40 Вт/м·К;
- коэффициент Пуассона 0,3–0,32;
- коэффициент термического расширения при 20°C – $(10-12) \cdot 10^{-6}$ 1/К; при 500.°C – $(14-15) \cdot 10^{-6}$ 1/К.

38ХА

1. Улучшаемая сталь, легированная хромом, кремнием, марганцем.

2. Хорошо деформируется в горячем состоянии, хорошо обрабатывается резанием. Удовлетворительно сваривается с предварительным подогревом и последующим отпуском. Может подвергаться азотированию.

3. Болты, шпильки, гайки, втулки, валики и др. детали.

4. $t_{\max} = 100\text{--}150^{\circ}\text{C}$.

60С2А

1. Пружинная сталь, легированная марганцем и кремнием.

2. Удовлетворительно деформируется в горячем состоянии.

Модуль сдвига $0,8 \cdot 10^5$ МН/м².

3. Плоские пружины.

4. $t_{\max} = 200^{\circ}\text{C}$.

12Х2Н4А

1. Цементуемая сталь.

2. Хорошо деформируется в горячем состоянии. Удовлетворительно обрабатывается резанием. Твердость цементованного слоя $\text{HRC} \geq 58$. Может использоваться после термоулучшения.

3. Шестерни, валики, кольца, поршни, оси, ролики.

4. $t_{\max} = 160^{\circ}\text{C}$.

20ХН3А

1. Улучшаемая сталь.

2. Хорошо деформируется в горячем состоянии, удовлетворительно обрабатывается резанием.

3. Болты, валики, втулки, шпильки, шестерни.

4. $t_{\max} = 100^{\circ}\text{C}$.

18Х2Н4ВА, 18Х2Н4МА (18ХНВА, 18ХНМА)

1. Цементуемая, улучшаемая сталь.

2. Хорошо деформируется в горячем состоянии. Может подвергаться азотированию.

3. В цементованном виде применяется для изготовления валов, рессор, втулок, шестерен, в нецементованном – для изготовления ответственных болтов, шпилек. Для крупногабаритных деталей может быть заменена сталями 12Х2Н4А, 14ХГСН2МА.

4. $t_{\max} = 150\text{--}300^{\circ}\text{C}$.

33ХНЗМА (ОХНЗМ)

1. Улучшаемая сталь.
2. Хорошо деформируется в горячем состоянии, после отжига – в холодном состоянии.
3. Массивные детали (вала, диски компрессоров и др.).
4. $t_{\max} = 500^{\circ}\text{C}$.

38Х2МЮА (38ХМЮА)

1. Азотируемая сталь.
2. Хорошо деформируется в горячем состоянии (полуфабрикаты – прутки, поковки, штамповки, трубы). Удовлетворительно обрабатывается резанием.
3. Шестерни, шпильки, валики, ролики и др. детали.
4. $t_{\max} = 500^{\circ}\text{C}$.

40ХН2МА (40ХНМА), 40ХН2ВА

1. Улучшаемая сталь.
2. Хорошо деформируется в горячем состоянии. Может подвергаться азотированию.
3. Коленчатые вала, валы винтов, вали роторов и др. силовые детали.
4. $t_{\max} = 500^{\circ}\text{C}$.

12Х2НВФА (ЭИ712), 12Х2НМФА

1. Улучшаемая сталь.
2. Хорошо деформируется в горячем состоянии, после отжига в холодном. Полуфабрикаты – листы, полосы, прутки, поковки, штамповки. Хорошо сваривается дуговой, аргоно-дуговой, контактной сваркой, удовлетворительно – газовой сваркой. Может подвергаться цементации.
3. Сварные конструкции повышенной прочности, не подвергаемые термообработке после сварки. Цементуемые детали (шестерни и др.).
4. $t_{\max} = 250^{\circ}\text{C}$ (для цементуемых деталей); $t_{\max} = 500^{\circ}\text{C}$ (для нецементуемых сварных и несварных конструкций).

30ХГСА

1. Улучшаемая сталь.

2. Хорошо деформируется в горячем состоянии, удовлетворительно штампуется в отожженном состоянии. Хорошо сваривается всеми видами сварки. Удовлетворительно обрабатывается резанием. Полуфабрикаты – листы, прутки, полосы, трубы, штамповки, поковки, проволока.

3. Болты, стыковые соединения, полки, фланцы.

4. $t_{\max} = 150-180^{\circ}\text{C}$.

14ХГСН2МА (ЭП176, ДИ-3А)

1. Улучшаемая сталь.

2. Хорошо деформируется в горячем состоянии. Удовлетворительно обрабатывается резанием. Может применяться взамен сталей с более высоким содержанием никеля (12Х2Н4А, 20ХН3А, 18Х2Н4ВА).

3. Шестерни, валы и др. нагруженные детали.

4. $t_{\max} = 200^{\circ}\text{C}$.

Физико-химические свойства конструкционных сталей приведены в прил., табл. П.3.

4. МЕДНЫЕ СПЛАВЫ

Медь и сплавы на её основе являются электропроводными, коррозионностойкими материалами. Они отличаются высоким сопротивлением износу и низким коэффициентом трения. Хорошие литейные свойства бронз и латуней дают возможность получить способом точного литья сложные фасонные детали авиационных агрегатов.

Приводимые в данном разделе сплавы объединены по признаку их основного назначения в четыре группы: конструкционные сплавы (латуни Л63, ЛА67-2.5 и бронзы БрОФ6,5, БрАЖ9-4, БрАЖН-4-4, БрАЖМц-10-3-1,5), жаропрочные сплавы (бронза БрХО,5, монель НМЖц28-2,5-1,5), сплав для упругих элементов бронза БрБ2), антифрикционные бронзы (Бр019, БрОФ10-1, ВрОС10-10, БрСуН6-2).

Л63

1. Латунь с содержанием цинка 37%.

2. Обладает высокой пластичностью, хорошо обрабатывается давлением в холодном состоянии. Отличается высокой коррозионной стойкостью. Удовлетворительно паяется и сваривается.

3. Сильфоны, уплотнительные прокладки, трубопроводы.

4. $t_{\max} = 100-150^{\circ}\text{C}$.

ЛА67-2,5

1. Латунь алюминиевая (67% меди, 2,5% алюминия, по 1% свинца и олова, остальное – цинк).

2. Обладает хорошими литейными свойствами (литье в кокиль, в землю); удовлетворительно обрабатывается резанием; сваривается аргоно-дуговой, газовой и контактной сваркой.

3. Детали арматуры; фасонные детали агрегатов.

4. $t_{\max} = 100^{\circ}\text{C}$.

БрОФ6,5-0,15

1. Бронза оловянно-фосфористая (6,5% олова, 0,15% свинца).

2. Хорошо обрабатывается давлением. Детали могут отливаться методом точного литья. Легко обрабатывается резанием. Хорошо сваривается и паяется.

3. Пружинные контакту, мембраны и др. Детали приборов и агрегатов.

4. $t_{\max} = 100^{\circ}\text{C}$.

БрАЖн10-4-4

1. Бронза алюминиево-железоникелевая (10% алюминия, 4,5% железа, 4,5% никеля).

2. Применяется в литом и деформированном состояниях. Удовлетворительно обрабатывается резанием. Хорошо сваривается дуговой и газовой сваркой.

3. Детали, работающие при высоких температурах: шестерни, втулки, шаровые пяты и фланцы.

4. $t_{\max} = 450^{\circ}\text{C}$.

БрАЖМц10-3-1, 5

1. Бронза алюминиево-железоникелевая (10% алюминия, 3% железа, 1,5% никеля).

2. Применяется в литом и деформированном состояниях. Хорошо деформируется в горячем состоянии. Удовлетворительно сваривается и обрабатывается резанием. Коэффициент трения со смазкой (масло МС) – 0,01; без смазки – 0,2.

3. Втулки, диски, обоймы и гайки крепления подшипников, шестерни, ниппели.

4. $t_{\max} = 400^{\circ}\text{C}$.

БрХ0,5 (БрХ0,8)

1. Жаропрочная хромистая бронза (содержание хрома 0,55%).

2. Хорошо обрабатывается давлением в холодном и горячем состоянии. Удовлетворительно обрабатывается резанием. Сваривается дуговой и электронно-лучевой сваркой. Обладает высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях.

3. Детали, сочетающие высокую тепло-электропроводность с жаропрочностью.

4. $t_{\max} = 700^{\circ}\text{C}$.

НМЖМц28-2, 5-1, 5 (монель)

1. Жаропрочный медно-никелевый сплав (28% меди, 2,5% железа, 1,6% марганца, остальное – никель).

2. Обрабатывается давлением в горячем и холодном состоянии. Имеет высокую жаропрочность до температуры 750°C .

3. Детали, работающие в агрессивных средах: рабочие колеса насосов, корпуса, клапаны, втулки и т.д.

4. $t_{\max} = 750^{\circ}\text{C}$.

БрБ2

1. Бронза бериллиевая (2% бериллия, 0,4% никеля).

2. Обрабатывается давлением в горячем и холодном состоянии (после закалки). Хорошо обрабатывается резанием и паяется.

3. Особо ответственные плоские пружины, пружинящие, мембраны сильфоны.

4. $t_{\max} = 175^{\circ}\text{C}$.

Бр019

1. Высокооловянистая антифрикционная бронза (19% олова).
2. Литейный сплав. Хорошо обрабатывается резанием. Коэффициент трения: со смазкой (масло МС-20) – 0,012, без смазки – 0,2. Имеет высокие пружинящие свойства.
3. Маслоуплотнительные кольца узлов трения.
4. $t_{\max} = 150^{\circ}\text{C}$.

БрОФ10-1

1. Оловянно-фосфористая антифрикционная бронза (10% олова, до 1% фосфора).
2. Имеет хорошие литейные свойства (литье в кокиль, в землю). Коэффициент трения со смазкой 0,008, без смазки – 0,100.
3. Подшипниковые втулки, зубчатые колеса, венцы червячных колес при термически обработанных червячках.
4. $t_{\max} = 200^{\circ}\text{C}$.

БрОС10-10

1. Оловянно-свинцовистая антифрикционная бронза (9% олова, 9% свинца).
2. Имеет хорошие литейные свойства (литье и кокиль, точное литье). Хорошо сваривается стыковой сваркой сопротивлением. Отлично обрабатывается резанием; легко прирабатывается, не склонна к заеданию.
3. Детали, работающие на трение в условиях смазки при средних нагрузках и высоких скоростях скольжения; втулки, золотники, подпятники и др. детали топливных насосов.
4. $t_{\max} = 150\text{--}200^{\circ}\text{C}$.

БрСуН6-2 (ЗВ-21Б)

1. Сурмяноникелевая антифрикционная бронза (6% сурьма, 2,5% никеля, 0,7% цинка).
2. Преимущественный способ получения полуфабрикатов – литье в кокиль. Имеет хорошую коррозионную стойкость. Удовлетворительно обрабатывается резанием.
3. Детали трения топливных насосов ГТД: роторы, подпятники, золотники, втулки и другие детали, работающие в среде керосина,

элементы фильтров. Коэффициент трения: со смазкой 0,016, в среде керосина – 0,15, без смазки – 0,20.

4. $t_{\max} = 100\text{--}150^\circ\text{C}$.

Физико-химические свойства сплавов на основе меди приведены в прил., табл. П.4.

5. ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ

Титановые сплавы представляют для авиадвигателестроения особый интерес, так как имеют следующие преимущества:

- 1) низкая плотность $\rho = 4400\text{--}4500 \text{ кг/м}^3$;
- 2) высокая удельная прочность σ_b / ρ (в 2–3 раза выше, чем у сталей);
- 3) высокая коррозионная стойкость при умеренных температурах.

Однако при использовании титановых сплавов необходимо учитывать их недостатки, связанные с такими особенностями, как:

- 1) высокая ползучесть при $t > 450^\circ\text{C}$;
- 2) низкий модуль упругости – примерно в 2 раза меньше, чем у сталей $E = 1,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, соответственно, детали из титановых сплавов имеют меньшую жесткость;
- 3) низкая теплопроводность в сочетании с высоким коэффициентом трения, что приводит к разогреву при обработке (поэтому титановые сплавы плохо обрабатываются резанием и деформированием в штампах); коэффициент трения может быть снижен путем азотирования поверхностного слоя;
- 4) повышенная окисляемость при высоких температурах (может воспламеняться, например, при задевании титановой лопатки за титановый корпус); сварка титановых сплавов осуществляется в инертной среде (например, в аргоне);
- 5) чувствительность к концентрации напряжений;
- 6) коэффициент термического расширения титановых сплавов ниже, чем у сталей и никелевых сплавов, и мало изменяется с увеличением температуры (в среднем от $8,5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/К}$ при 20°C до $9,6 \cdot 10^{-5} \text{ 1/К}$ при 600°C).

Максимальная температура применения $t_{\max} = 550\text{...}600^\circ\text{C}$.

Основным способом получения полуфабрикатов из титановых сплавов является деформирование. Число разработанных в настоящее время литейных титановых сплавов невелико.

BT1-0

1. Нелегированный титан.

2. Малопрочный высокопластичный сплав. Очень хорошо сваривается сваркой плавлением и контактной сваркой. Удовлетворительно обрабатывается резанием. Применяется в отожженном состоянии. Полуфабрикаты: листы, поковки, штамповки, профили.

3. Малонагруженные детали сложной формы, детали из листа. Тонкостенные корпусные детали входного направляющего аппарата и первых ступеней компрессора.

4. $t_{\max} = 250\text{--}300^\circ\text{C}$.

OT4-1

1. Высокопластичный листовой термически неупрочняемый сплав, легированный алюминием (1,8%) и марганцем (1,3%).

2. Хорошо деформируется и сваривается аргоно-дуговой и контактной сваркой. Может быть использован для изготовления поволоков, штамповок, прутков.

3. Сварные узлы сложной формы (направляющий аппарат компрессора, диффузор и трубопроводы камеры сгорания), детали крепления.

4. t_{\max} от 350°C (10 000 час) до 500°C (100 час).

BT5

1. Деформируемый сплав средней прочности, легированный алюминием (4,8%).

2. Полуфабрикаты – прутки, поковки, штамповки. Хорошо сваривается аргоно-дуговой, электрошлаковой, контактной сваркой.

3. Детали компрессора (лопатки, проставки и др.).

4. $t_{\max} = 400^\circ\text{C}$.

BT5-1

1. Листовой термически неупрочняемый сплав, легированный алюминием (5%) и оловом (2,5%).

2. Деформируется в подогретом состоянии.
3. Сварные силовые детали (кожухи диффузоров камер сгорания, корпуса и т.д.).
4. $t_{\max} = 450^{\circ}\text{C}$.

ВТ5Л

1. Литейный сплав, легированный алюминием (5%).
2. Удовлетворительно сваривается аргоно-дуговой сваркой.
3. Силовые детали сложной конструкции.
4. $t_{\max} = 400^{\circ}\text{C}$.

ВТ6

1. Деформируемый титановый сплав.
2. Деформируется в подогретом состоянии. Хорошо сваривается аргоно-дуговой и контактной сваркой.
3. Корпусные детали компрессоров и турбин.
4. $t_{\max} = 450 \dots 500^{\circ}\text{C}$.

ВТ20

1. Листовой сплав, легированный алюминием (6,5%), молибденом (1,3%), ванадием (1,2%), цирконием (2%).
2. Деформируется в подогретом состоянии. Хорошо сваривается аргоно-дуговой и контактной сваркой.
3. Корпусные детали компрессоров и турбин.
4. $t_{\max} = 450 \dots 500^{\circ}\text{C}$.

ВТ3-1

1. Жаропрочный деформируемый сплав, легированный алюминием (6%), молибденом (2,5%), хромом (2%), железом и кремнием.
2. Сваривается аргоно-дуговой, электроннолучевой и диффузионной сваркой. Под маркой ВТ3-1Л используется для фасонного литья.
3. Лопатки и диски компрессоров; кольцевые, крепежные и др. детали.
4. В отожженном состоянии при 400°C может работать неограниченно долго, при 450°C – 3000 час. В термически упрочненном состоянии: при 400°C – 1000 час, 450°C – 500 час.

BT8

1. Жаропрочный деформируемый сплав, легированный алюминием (6,4%), молибденом (3,3%), цирконием, кремнием.
2. Сваривается электроннолучевой сваркой. Полуфабрикаты – катаные и прессованные прутки, поковки, штамповки.
3. Детали компрессоров (диски, проставки, барабанные ротора и др.), детали приводов.
4. В отожженном состоянии при 450°C может работать неограниченно долго, при 450°C – 6000 час. В термически упрочненном состоянии: при 450°C – 6000 час, 500°C – 500 час.

BT9

1. Жаропрочный деформируемый сплав, легированный алюминием (6,4%), молибденом (3,3%), цирконием (1,6%).
2. Сваривается аргоно-дуговой и электроннолучевой сваркой.
3. Детали компрессоров (диски, лопатки, кольца), крепежные детали.
4. В отожженном состоянии t_{\max} от 450°C (6000 час) до 550°C (100 час). В термически упрочненном состоянии от 400°C (6000 час) до 500°C (100 час).

BT9Л

1. Жаропрочный литейный сплав. Химический состав тот же, что и у BT9, плюс 0,3% кремния.
2. То же, что и BT9.
3. То же, что и BT9.
4. t_{\max} от 500°C (2000 час) до 550°C (100 час).

BT18, BT18У

1. Деформируемый жаропрочный сплав, легированный алюминием (7,7%), цирконием (11%), ниобием (1%), молибденом, кремнием.
2. Слабо упрочняется термообработкой. Применяется преимущественно в отожженном состоянии. Сваривается электроннолучевой и аргоно-дуговой сваркой.
3. Лопатки и др. детали компрессоров.
4. $t_{\max} = 550\text{--}600^\circ\text{C}$. Для деталей разового действия $t_{\max} = 800^\circ\text{C}$.

BT25

1. Деформируемый жаропрочный сплав, легированный алюминием, цирконием, оловом, вольфрамом, молибденом, кремнием.
2. Хорошо сваривается диффузионным способом.
3. Детали компрессоров.
4. t_{\max} от 500°C (6000 час) до 550°C (3000 час).

Физико-механические характеристики титановых сплавов приведены в прил., табл. П.5.1–5.3 и П.6. При значениях параметра $P < 14000$ для рассматриваемых титановых сплавов (для BT3-1 и BT6 при $P < 10000$) в качестве пределов длительной прочности следует при любых длительностях принимать минимальные значения пределов прочности σ_b при соответствующих температурах.

6. КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ, ЖАРОСТОЙКИЕ И ЖАРОПРОЧНЫЕ СТАЛИ

Стали этой группы являются высоколегированными; они содержат не менее 10% легирующих элементов (считая по верхнему пределу) и более 45% железа. В зависимости от основных свойств стали данной группы подразделяют на следующие классы:

– коррозионностойкие (нержавеющие) стали, обладающие стойкостью против электрохимической и химической коррозии (атмосферной, щелочной, солевой, кислотной), межкристаллитной коррозии, коррозии под напряжением и др.;

– жаростойкие (окалиностойкие) стали, обладающие стойкостью против химического разрушения по поверхности в газовых средах при температуре выше 550°C, работающие в ненагруженном или слабонагруженном состоянии;

– жаропрочные стали, способные работать в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение определенного времени и обладающие при этом достаточной жаростойкостью.

Подразделение сталей на классы для ряда марок является условным. Существуют марки сталей, которые могут быть отнесены к двум или трем классам одновременно.

Практически все стали рассматриваемой группы – деформируемые.

12X18H10T, 12X18H9T

1. Коррозионностойкая сталь с хорошей жаростойкостью.
2. Хорошо деформируется в горячем состоянии (полуфабрикаты – прутки, ленты трубы, листы). Обладает высокой пластичностью в закаленном состоянии. Хорошо сваривается, удовлетворительно обрабатывается резанием.
3. Детали двигателей и агрегатов.
4. $t_{\max} = 600 \dots 800^{\circ}\text{C}$.

12X17Г9АН4 (ЭИ878)

1. Коррозионностойкая сталь.
2. Хорошо деформируется в горячем и холодном состоянии. Полуфабрикаты – прутки, полосы, листы, трубы. Хорошо сваривается аргоно-дуговой и контактной сваркой. Удовлетворительно обрабатывается резанием.
3. Детали, работающие во всеклиматических условиях, в том числе в контакте с топливом. Сплав может применяться вместо сталей 12X18H10T и 12X18H9T для экономии никеля.
4. t_{\max} от 400°C (длительно) до 800°C (кратковременно).

14X17H2 (ЭИ268)

1. Коррозионностойкая сталь с достаточно высокой жаростойкостью.
2. Хорошо деформируется в горячем состоянии. С содержанием никеля 3–3,5% и углерода 0,07–0,1% используется как литейная сталь.
3. Рабочие и спрямляющие лопатки компрессоров, диски, валы, втулки.
4. $t_{\max} = 500 \dots 550^{\circ}\text{C}$ (во влажной среде $400 \dots 450^{\circ}\text{C}$).

20X23H18 (ЭИ417)

1. Жаростойкая сталь с хорошей жаропрочностью.
2. В закаленном состоянии обладает высокой пластичностью и может подвергаться глубокой вытяжке и др. видам холодной штамповки. Хорошо сваривается всеми видами сварки.
3. Жаровые трубы и др. элементы камер сгорания, лопатки и кольца сопловых аппаратов турбины.
4. $t_{\max} = 950 \dots 1000^{\circ}\text{C}$.

13X11H2B2MФ (ЭИ961), 11X11H2B2MФ (ЭИ962)

1. Жаропрочная сталь.

2. Деформируется в горячем и холодном состоянии. В холодном состоянии обладает хорошей технологической пластичностью. Хорошо сваривается всеми видами сварки. Удовлетворительно обрабатывается резанием.

3. Диски, лопатки и др. нагруженные детали компрессоров. Сварные кольцевые детали. Пружины, работающие в топливе и масле.

4. $t_{\max} = 600^{\circ}\text{C}$ (для пружин – 400°C).

37X12H8Г8MФБ (ЭИ481)

1. Жаропрочная сталь.

2. Хорошо деформируется в горячем состоянии. Хорошо обрабатывается резанием.

3. Диски турбин, бандажные кольца, экраны, элементы лабиринтных уплотнений, крепежные детали.

4. $t_{\max} = 700^{\circ}\text{C}$.

ХН38ВТ (ЭИ703)

1. Жаростойкая сталь (сплав на железоникелевой основе) с хорошей жаростойкостью.

2. Хорошо деформируется в горячем состоянии, хорошо штампуется в холодном состоянии. Хорошо сваривается дуговой и контактной сваркой. Полуфабрикаты – листы, прутки. Может применяться взамен сплавов ХН75МБТЮ и ХН78Т для экономии никеля.

3. Жаровые трубы камер сгорания, детали форсажных камер, детали типа оболочек, работающие при умеренных напряжениях.

4. $t_{\max} = 950 \dots 1000^{\circ}\text{C}$.

12X25H16Г7AP (ЭИ835)

1. Жаростойкая сталь с умеренной жаропрочностью.

2. Хорошо деформируется в холодном состоянии. Хорошо сваривается контактной и аргоно-дуговой сваркой. Рекомендуются для замены жаростойких сплавов на никелевой основе.

3. Жаровые трубы и другие листовые детали камер сгорания, кольца сопловых аппаратов.

4. $t_{\max} = 950 \dots 1000^{\circ}\text{C}$.

ЭП608Ш

1. Жаропрочная мартенситная сталь.
2. Сваривается всеми видами сварки.
3. Валы, направляющие аппараты и другие силовые детали компрессоров.
4. $t_{\max} = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, кратковременно может работать при $700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ЭП718ИД

1. Жаропрочный железо-никелевый сплав.
2. Хорошо деформируется в горячем состоянии.
3. Рабочие лопатки, валы, корпуса компрессоров и турбин.
4. $t_{\max} = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ЭП708ВД

1. Жаропрочный железо-никелевый сплав.
2. Хорошо деформируется в горячем состоянии.
3. Корпусные детали компрессоров и турбин.
4. $t_{\max} = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ХН35ВТЮ (ЭИ787)

1. Жаропрочная сталь (сплав на железоникелевой основе).
2. Удовлетворительно сваривается дуговой и аргоно-дуговой сваркой.
3. Диски и лопатки турбин и компрессоров.
4. $t_{\max} = 650\text{...}750\text{ }^{\circ}\text{C}$.

40Х15Н7Г7Ф2МС (ЭИ388)

1. Жаропрочная сталь.
2. Хорошо деформируется в горячем состоянии. Хорошо обрабатывается резанием и сваривается в термообработанном состоянии. Для повышения жаростойкости детали алитуют.
3. Малонагруженные лопатки турбин, крепежные детали, диски, корпуса и сопловые аппараты турбин.
4. $t_{\max} = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для алитированных деталей – $900\text{ }^{\circ}\text{C}$).

10Х11Н23Т3МР (ЭИ696М, ЭП33)

1. Жаропрочная сталь.
2. Деформируется в горячем состоянии, хорошо сваривается.

3. Диски, рабочие лопатки компрессоров и турбин, кольцевые корпусные детали, крепеж; пружины и др. упругие элементы.

4. $t_{\max} = 750 \dots 800^{\circ}\text{C}$.

13X14H3B2ФР (ЭИ736)

1. Жаропрочная сталь.

2. Хорошо деформируется в горячем состоянии.

3. Диски, валы, стяжные болты, лопатки и др. высоконагруженные детали компрессоров; детали, работающие в условиях повышенной влажности.

4. $t_{\max} = 600 \dots 650^{\circ}\text{C}$.

Физико-механические свойства коррозионностойких, жаростойких и жаропрочных сталей даны в прил., табл. П.7.1–7.3 и П.8. В табл. П.7.1–7.3 значения коэффициентов термического расширения при температурах, отличающихся от 20°C , даются в виде средних значений в интервале от 20°C до указанной температуры.

7. СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ И ХРОМА

Основной структурой сплавов на никелевой основе является твердый раствор легирующих элементов (хрома, вольфрама, молибдена, ванадия и др.) в никелевой основе. Никелевые сплавы применяются для изготовления деталей наиболее теплонапряженных элементов двигателя – основных и форсажных камер, газовых турбин, выходных устройств.

В зависимости от основных свойств никелевые сплавы условно делятся на жаростойкие и жаропрочные; по способу получения заготовок – на литейные и деформируемые.

7.1. Жаростойкие сплавы на никелевой основе

ХН78Т (ЭИ435)

1. Деформируемый никельхромистый сплав (содержание хрома 21%).

2. Хорошо сваривается дуговой и роликовой сваркой. Хорошо отливается методом точного литья. Обладает высокой пластичностью в закаленном состоянии.

3. Детали камер сгорания и реактивных сопел, сопловые лопатки; сварные кольцевые детали.

4. $t_{\max} = 1000^{\circ}\text{C}$ (с эмалевым покрытием – 1100°C).

ХН75МБТЮ (ЭИ602)

1. Деформируемый сплав с содержанием хрома 20%.

2. Хорошо сваривается контактной и аргоно-дуговой сваркой.

Для повышения жаростойкости при температуре выше 1100°C детали алитируют.

3. Листовые детали камер сгорания, турбин и форсажных камер.

4. $t_{\max} = 950 \dots 1050^{\circ}\text{C}$.

ХН60ВТ (ЭИ868, ВЖ-98)

1. Деформируемый сплав с содержанием хрома 25%.

2. Обладает способностью к глубокой вытяжке, хорошо сваривается всеми видами сварки.

3. Детали камер сгорания, форсажных камер, экраны, турбины.

4. $t_{\max} = 1000 \dots 1100^{\circ}\text{C}$.

ХН70Ю (ЭИ652)

1. Деформируемый сплав с содержанием хрома 27%.

2. Плохо обрабатывается давлением, при температуре $700-800^{\circ}\text{C}$ имеет пониженную пластичность. Удовлетворительно сваривается аргоно-дуговой и контактной сваркой.

3. Карманы смесителей кольцевых камер сгорания, сопловые лопатки турбин.

4. $t_{\max} = 1100^{\circ}\text{C}$.

ХН33КВЮ (ВЖ145, ЭК102)

1. Жаропрочный свариваемый никель-кобальтовый сплав.

2. Удовлетворительно обрабатывается давлением, хорошо сваривается. Полуфабрикаты – листы.

3. Для особо теплонапряженных деталей (элементы жаровых труб камер сгорания, экраны форсажных камер, корпуса КВД и опор турбины и др. элементы горячего тракта ГТД).

4. $t_{\max} = 1100^{\circ}\text{C}$.

ХН58МБЮ (ВЖ159, ЭК171)

1. Жаропрочный стареющий никель-хромовый сплав без кобальта и вольфрама.

2. Сплав демонстрирует хорошую свариваемость и высокую пластичность, склонен к дисперсионному твердению. Полуфабрикаты – лента, листы. Производится металлопорошковый вариант сплава для аддитивных технологий.

3. Для особо теплонапряженных деталей (элементы камер сгорания, в т.ч. жаровые трубы, экраны, кожухи и другие элементов горячего тракта) ГТД.

4. $t_{\max} = 1100^{\circ}\text{C}$.

Физико-механические свойства жаростойких никелевых сплавов приведены в прил., табл. П.9.1, 9.2. Значения коэффициентов термического расширения при температурах, отличающихся от 20°C , даются в виде средних значений в интервале от 20°C до указанной температуры.

7.2. Сплавы на основе хрома

Нелегированный хром имеет плотность 7200 кг/м^3 , температуру плавления около 1900°C , обладает высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах, однако в двигателестроении практически не используется вследствие высокой хрупкости. Сплавы на основе хрома можно применять в качестве жаростойких при температурах $1100\text{--}1500^{\circ}\text{C}$. Хромовые сплавы не получили широкого распространения, но рассматриваются как перспективный тугоплавкий материал для деталей турбин и камер сгорания, работающих в условиях высокотемпературной газовой коррозии.

ВХ-2И

1. Пластичный сплав, легированный титаном, ванадием, иттрием

2. Полуфабрикаты – прутки, фасонные профили. Деформирование в горячем состоянии повышает прочность и пластичность сплава.

3. Детали, работающие без защитных покрытий в агрессивных газовых средах.

4. t_{\max} длительно (10000 час.) при 1300°C , кратковременно (100 час.) при 1500°C .

ВХ-4Л

1. Пластичный сплав, легированный титаном, ванадием, на хромоникелевой основе (содержание никеля 32%).

2. Детали изготавливают методом точного литья.

3. Детали, работающие без покрытий, в условиях термических циклов, в пламени сгорающего топлива (например, элементы системы стабилизации пламени в форсажных камерах).

4. $t_{\max} = 1100\text{--}1300^{\circ}\text{C}$.

Физико-механические свойства сплавов на основе хрома приведены в прил., табл. П.9.1, 9.2.

7.3. Жаропрочные литейные сплавы на никелевой основе

Литейные никелевые сплавы не подвергаются обработке давлением, они могут быть более легированными и, следовательно, и более жаропрочными, чем деформируемые жаропрочные сплавы. Детали изготавливают методом точного литья по выплавляемым моделям. Большинство литейных сплавов применяется в термически обработанном состоянии.

Литые лопатки газотурбинных двигателей иногда подвергают алитированию для повышения сопротивления окислению поверхностных слоев.

ЖСЗ (ЭИ618)

1. Литейный сплав, легированный хромом (16%), молибденом (4%), титаном и алюминием (по 2%), вольфрамом (5%), железом (7%).

2. Литые детали закаливают. Сплав имеет небольшую пластичность и жаростойкость до 950°C .

3. Сопловые лопатки турбин.

4. $t_{\max} = 850^{\circ}\text{C}$.

ВЖЛ 8

1. Литейный сплав, легированный хромом (16%), молибденом (5%), титаном (2%), алюминием (3%), железом (10%).

2. После отлива детали термообработывают в вакууме или в среде аргона.

3. Сопловые и рабочие лопатки, привариваемые к корпусам или дискам, створки реактивного сопла.

4. $t_{\max} = 950^{\circ}\text{C}$ (алитированные детали).

ХН67МВТЮ (ЭП202, ЭИ445Р)

1. Литейный сплав, легированный хромом (18%), титаном (2,5%), алюминием (1%), вольфрамом (4%), молибденом (4%).

2. Может применяться в деформированном состоянии.

3. Сопловые лопаточные венцы и цельнолитые роторы турбин небольших размеров, листовые детали турбин.

4. $t_{\max} = 800 \dots 850^{\circ}\text{C}$.

ВЖЛ12У

1. Литейный сплав, легированный вольфрамом, кобальтом, титаном, алюминием, ванадием, цирконием, бором.

2. Обладает повышенной пластичностью. Минимальная толщина стенок литых деталей 0,6...1 мм. Производится металлопорошковый вариант сплава для аддитивных технологий.

3. Ответственные высоконагруженные детали турбин и детали выходных устройств.

4. $t_{\max} = 1050^{\circ}\text{C}$.

ЖС6К

1. Литейный сплав, легированный хромом (12%), молибденом (4%), титаном (3%), алюминием, кобальтом, вольфрамом (по 5%), железом (2%).

2. При отливке реализуется равноосная структура. Производится металлопорошковый вариант сплава для аддитивных технологий.

3. Сопловые и рабочие лопатки турбин, цельнолитые роторы.

4. $t_{\max} = 1000^{\circ}\text{C}$.

ЖС6У

1. Литейный сплав, легированный хромом, вольфрамом, молибденом, алюминием, титаном, ниобием.

2. При отливке реализуется равноосная структура.

3. Рабочие и сопловые лопатки турбин.

4. $t_{\max} = 1050^{\circ}\text{C}$.

ЖС6Ф

1. Литейный сплав.
2. При отливке реализуется равноосная структура. Сплав ЖС6ФН отливается методом направленной кристаллизации, обеспечивающей однонаправленную структуру.
3. Рабочие и сопловые лопатки турбин.
4. $t_{\max} = 1050^{\circ}\text{C}$.

ЖС26ВСНК

1. Литейный сплав.
2. Детали отливаются методом направленной кристаллизации.
3. Рабочие и сопловые лопатки турбин.
4. $t_{\max} = 1100^{\circ}\text{C}$.

ЖС30

1. Литейный сплав.
2. Детали отливается методом направленной кристаллизации,
3. Рабочие и сопловые лопатки турбин.
4. $t_{\max} = 1100^{\circ}\text{C}$.

ЖС32ВНК

1. Литейный сплав, дополнительно легированный (помимо хрома, вольфрама, молибдена, алюминия, титана) рением и танталом.
2. Детали отливаются методом направленной кристаллизации.
3. Рабочие и сопловые лопатки турбин.
4. $t_{\max} = 1100^{\circ}\text{C}$.

ЖС36

1. Литейный сплав, дополнительно легированный (помимо хрома, вольфрама, молибдена, алюминия, титана) рением.
2. Детали отливается методом направленной кристаллизации.
3. Рабочие лопатки турбин.
4. $t_{\max} = 1100^{\circ}\text{C}$.

ВЖМ1

1. Литейный безуглеродистый сплав на основе никеля с добавлением рения.
2. Сплав с направленной монокристаллической структурой. Выплавка в вакуумных индукционных печах.
3. Рабочие лопатки турбин.
4. $t_{\max} = 1100^{\circ}\text{C}$.

ВЖМ4

1. Литейный сплав на основе никеля.
2. Выплавляют в вакуумных индукционных печах.
3. Детали турбин.
4. $t_{\max} = 1100^{\circ}\text{C}$.

ВЖМ8

1. Литейный сплав на основе никеля.
2. Сплав с направленной монокристаллической структурой
3. Рабочие лопатки турбин.
4. $t_{\max} = 1170^{\circ}\text{C}$.

Физико-механические свойства жаропрочных литейных никелевых сплавов приведены в прил., табл. П.10.1–10.3 и П.11.

Ввиду нестабильности характеристик этих сплавов при температурах t ниже 700°C и значениях параметра $P < 20000$ в качестве средних значений пределов длительной прочности следует принимать $\sigma \leq 900$ МПа.

В табл. 10.1–10.3 значения коэффициентов термического расширения при температурах, отличающихся от 20°C , даются в виде средних значений в интервале от 20°C до указанной температуры.

7.4. Жаропрочные деформируемые сплавы на никелевой основе

Требуемые жаропрочные свойства обеспечиваются в результате термической обработки, которая состоит из закалки на твердый раствор и старения; в ряде случаев применяется ступенчатая закалка. Для снятия остаточных напряжений после механической обработки (включая шлифование и полирование) готовые детали подвергают

нагреву выше температур старения, а затем – дополнительному старению для восстановления механических свойств.

Сплавы этой группы используют для изготовления деталей турбин (лопаток, дисков, корпусных элементов деталей уплотнений и др.) и форсажных камер.

ХН51ВМТЮКФР (ЭП220)

1. Жаропрочный деформируемый сплав.
2. Жаростойкость сплава может быть повышена алитированием.
3. Рабочие лопатки турбин.
4. $t_{\max} = 950^{\circ}\text{C}$.

ХН70ВМТЮ (ЭИ617)

1. Жаропрочный деформируемый сплав.
2. Удовлетворительно штампуется и куется. Удовлетворительно обрабатывается резанием.
3. Лопатки и элементы роторов газовых турбин.
4. $t_{\max} = 850 \dots 900^{\circ}\text{C}$.

ЖС6-КП

1. Жаропрочный сплав, применяемый как в деформированном, так и в литом состоянии.
2. Удовлетворительно деформируется в горячем состоянии.
3. Рабочие и сопловые лопатки турбин и турбостартеров.
4. $t_{\max} = 950 \dots 1000^{\circ}\text{C}$.

ХН77ТЮР (ЭИ437Б)

1. Жаропрочный деформируемый сплав.
2. Хорошо сваривается методом электрошлаковой сварки.
3. Диски, лопатки и др. нагруженные детали турбин.
4. $t_{\max} = 750 \dots 800^{\circ}\text{C}$.

ХН62МВКЮ (ЭИ867)

1. Жаропрочный деформируемый сплав.
2. При рабочих температурах выше 900°C рекомендуется алитирование.
3. Лопатки турбин.
4. t_{\max} от 800°C (10000 час.) до 900°C (1000 час.).

ХН56ВМКЮ (ЭП109, ЭИ867А)

1. Жаропрочный деформируемый сплав.
2. То же, что и ХН62МВКЮ.
3. Лопатки турбин.
4. $t_{\max} = 950^{\circ}\text{C}$.

ХН56ВМТЮ (ЭП199, ВЖ101)

1. Жаропрочный деформируемый сплав для изготовления сварных элементов.
2. Сваривается аргоно-дуговой сваркой.
3. Высокопрочные теплонапряженные силовые элементы турбин (корпуса, кольца, сопловые лопатки и др.).
4. $t_{\max} = 900 \dots 950^{\circ}\text{C}$.

ХН50МВКТЮ-ВД (ЭП99-ВД)

1. Жаропрочный деформируемый сплав для изготовления сварных элементов.
2. Сваривается аргоно-дуговой сваркой с использованием присадочного материала.
3. Высоконагруженные сварные узлы турбин, теплонапряженные силовые элементы турбин, кожухи камер сгорания и ФК.
4. $t_{\max} = 900 \dots 1000^{\circ}\text{C}$.

ХН75ВМЮ (ЭИ827)

1. Жаропрочный деформируемый сплав.
2. Обладает высокой окалиностойкостью.
3. Рабочие лопатки турбин.
4. $t_{\max} = 800 \dots 850^{\circ}\text{C}$.

ХН73МБТЮ (ЭИ698ВД)

1. Жаропрочный деформируемый сплав.
2. Хорошо деформируется в горячем состоянии.
3. Диски и другие нагруженные детали турбин.
4. $t_{\max} = 750 \dots 800^{\circ}\text{C}$.

ЭК151ИД, ЭК152ИД

1. Высокожаропрочные деформируемые сплавы.
2. Удовлетворительно деформируется с использованием эффекта сверхпластичности.
3. Диски турбин.
4. $t_{\max} = 750 \dots 800^{\circ}\text{C}$.

ЭП742ИД

1. Высокожаропрочный деформируемый сплав.
2. Деформация из слитка.
3. Диски турбин и компрессоров, вращающиеся дефлекторы турбин.
4. $t_{\max} = 750 \dots 800^{\circ}\text{C}$.

ЭП741П, ЭП741НП

1. Высокожаропрочные гранулируемые сплавы.
2. Детали получают методом горячего изостатического прессования.
3. Диски и валы турбин и компрессоров.
4. $t_{\max} = 750 \dots 800^{\circ}\text{C}$.

ЭП962П

1. Высокожаропрочный деформируемый сплав для дисков, работающих при высоких окружных скоростях с уровнем напряжений по ступице до 1000 МПа.
2. Детали получают методом деформации из слитка и методом горячего изостатического прессования.
3. Диски турбин.
4. $t_{\max} = 700^{\circ}\text{C}$.

ЭП975-ИД

1. Высокожаропрочный сплав с высоким сопротивлением малоциклового усталости, в том числе и при наличии концентраторов напряжений.
2. Деформируемый сплав.
3. Диски турбин.
4. $t_{\max} = 975^{\circ}\text{C}$.

ХН29К28ВМТ (ВЖ171)

1. Высокожаропрочный свариваемый сплав на Ni-Co-Cr основе, упрочняемый химико-термической обработкой.

2. Хорошая свариваемость, склонность к дисперсному упрочнению, высокая стабильность нитридов обеспечивает повышенную жаропрочность сплава. Полуфабрикаты – листы.

3. Жаровые трубы камер сгорания, элементы сопла и форсажной камеры.

4. $t_{\max} = 1250^{\circ}\text{C}$.

ХН56К16МБВЮТ (ВЖ172)

1. Высокопрочный свариваемый никелевый сплав.

2. Деформируемый сплав, обладающий хорошей свариваемостью, склонный к дисперсионному твердению. Имеет равноосную структуру. Полуфабрикаты – листы, литые, катаные кольца, профили.

3. Роторы КВД, корпуса и высоконагруженные детали статора ГТД.

4. $t_{\max} = 900^{\circ}\text{C}$.

ХН50ВМТЮБ (ЭП648)

1. Деформируемый никель-хромовый сплав.

2. Обладает хорошей свариваемостью; полуфабрикаты – листы, прутки, трубы. Производится металлопорошковый вариант сплава для аддитивных технологий.

3. Детали горячего тракта ГТД, длительно работающие в агрессивной газовой среде.

4. $t_{\max} = 1100^{\circ}\text{C}$.

Физико-механические свойства жаропрочных деформируемых никелевых сплавов приведены в прил., табл. П.12.1–12.5 и П.13. В табл. П.12.1–12.5 значения коэффициентов термического расширения при температурах, отличающихся от 20°C , даются в виде средних значений в интервале от 20°C до указанной температуры.

В качестве пределов длительной прочности при значениях параметра P меньших, чем приведенные в табл. П.13, следует принимать минимальные значения пределов прочности σ_B при соответствующих температурах.

8. ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Интерметаллид (интерметаллическое соединение) — химическое соединение из двух или более металлов. Интерметаллиды, как и другие химические соединения, имеют фиксированное соотношение между компонентами. Интерметаллиды обладают, как правило, высокой твердостью и высокой химической стойкостью.

Для компрессоров перспективными интерметаллидами являются **алюминиды титана** Ti_3Al , $TiAl$.

Интерметаллиды системы **Ti-Al** являются более легкими, чем никелевые и титановые суперсплавы, не требуют защиты от окисления при рабочих температурах, более дешевые, не требуют для легирования большого количества дорогих легирующих элементов, имеют достаточно высокие прочностные характеристики ($\sigma_{\epsilon}^{1200^{\circ}C} \geq 100 \text{ МПа}$).

Широкое применение сплавов на основе алюминидов титана сдерживается отсутствием эффективных и недорогих способов получения. Производство сплавов на основе алюминидов титана связано со значительными трудностями вследствие различий в температурах плавления и испарения, а также плотностях их компонентов. Технология их производства очень сложна и, как правило, многостадийна.

ВИТ1

1. Интерметаллидный жаропрочный титановый сплав марки ВИТ1 предназначен для изготовления лопаток и корпусных деталей КВД, работающих при температурах до $700^{\circ}C$ в течение 100 ч без защитных покрытий. Имеет высокую удельную жаропрочность при рабочих температурах, высокую жаростойкость

2. Характеризуется относительно невысокой пластичностью, тем не менее, используется при изготовлении кованных и штампованных заготовок деталей ГТД.

3. Сопловые лопатки ГТД.

4. $t_{\max} = 650 \dots 700^{\circ}C$.

ВТИ-4

1. Титановый сплав марки ВТИ-4 – деформируемый жаропрочный интерметаллидный сплав с плотностью 5100 кг/м³.

2. Разработаны технология термомеханической и термической обработок полуфабрикатов. Сплав пожаробезопасен до температуры 700°C. Сплав перспективен для использования в качестве матричного материала для интерметаллидных композиционных материалов, упрочняемых волокном карбида кремния.

3. Корпусные, статорные детали авиадвигателей, облегченных панелей и элементов аэрокосмических конструкций.

4. $t_{\max} = 650^{\circ}\text{C}$

Для деталей камер сгорания, турбин и выходных устройств перспективными являются материалы на основе алюминидов никеля Ni₃Al, NiAl.

ВКНА-4У, ВКНА-1В

1. Интерметаллидные сплавы на базе алюминидов никеля.

2. Литейные сплавы. Производятся металлопорошковые варианты сплавов для аддитивных технологий.

3. Рабочие и сопловые лопатки турбин, жаровые трубы и кронштейны камер сгорания, створки реактивных сопел.

4. $t_{\max} = 1250^{\circ}\text{C}$.

ВИН-2

1. Сплав относится к классу литейных жаропрочных интерметаллидных сплавов, на основе алюминидов никеля, обладает повышенной жаропрочностью.

2. Механические свойства штамповок при температуре испытаний 20 °С: Временное сопротивление ($\sigma_{\text{в}}$) – не менее 1080 МПа; Относительное удлинение (δ) – не менее 8%; Предел длительной прочности при температуре испытаний 975°C, на базе не менее 40 ч – 290 МПа.

3. Сопловые и рабочие лопатки ГТД

4. $t_{\max} = 1200^{\circ}\text{C}$ длительно с кратковременными забросами до 1250°C.

Физико-механические свойства сплавов на основе интерметаллидов приведены в прил., табл. П.14.

9. КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

9.1. Состав и физико-механические свойства керамических материалов

Керамика — изделия из неорганических материалов и их смесей с минеральными добавками, а также оксидов металлов и других тугоплавких соединений, изготавливаемые под воздействием высокой температуры с последующим охлаждением. Основными компонентами технической керамики являются оксиды, бескислородные соединения металлов, а также глины.

В авиастроении различают керамику карбидную (карбид вольфрама, карбид кремния), алюмооксидную, циркониевую (на основе ZrO_2), нитридную (на основе нитрида кремния, нитрида бора).

Физико-механические свойства керамических материалов приведены в табл. 2.

Преимущества керамических материалов:

1. Высокая жаропрочность (у нитрида кремния прочность при 20°C и при 1000°C одинакова – 1000 МПа).
2. Высокая жаростойкость.
3. Низкая плотность.
4. Низкий коэффициент термического расширения (меньше зазоры, меньше допуски на размеры).
5. Повышенная эрозионная стойкость.
6. Низкая стоимость и доступность сырья.
7. Высокий модуль упругости.
8. Нечувствительность к соединениям серы и ванадия.
9. Высокая твердость (например, твердость Si_3N_4 HV=1700 по сравнению с HV=700 для 12X18H10T при 20°C).

Недостатки керамических материалов:

1. Сравнительно высокая скорость распространения трещин, чувствительность к концентрации напряжения.
2. Высокая стоимость изготовления изделия.
3. Разброс прочностных характеристик.

Для получения керамики на основе Si_3N_4 применяют следующие методы.

1) Азотирование кремния.

2) Газофазный синтез.

3) Реакционное спекание.

4) Горячее изостатическое прессование (процесс заключается в поддержании всестороннего равномерного давления 100...300 МПа на оболочку с порошковой массой при температуре 1900...1970 К в среде аргона в течении приблизительно 2 часов). Полученный материал обладает нулевой пористостью, деталь не требует механической обработки после формования.

Таблица 2

Свойства керамических материалов

Материал	σ_B , МПа, при T , К	$T_{\text{плав}}$, К	ρ , кг/м ³	$E \cdot 10^{-5}$, МПа при 1260 К	$\alpha \cdot 10^6$, 1/К	λ , Вт/м·К
Si ₃ N ₄ , горяче- пресс.	180 (1470 К)	2170	3200	2,9	2,3 (300– 1270К)	18
Si ₃ N ₄ , спеченный	123... 240 (1293 К)	2520	3120	2,0	4,8 (300- 1270 К)	22
SiC	420 (1800 К)	2870	3040	3,94 (300 К)	5,2 (300– 1270 К)	16,7 (470– 1670 К)
ZrO ₂	600 (1070 К)	2640	5700	2,0	9,8	3,5 (1670 К)
Al ₂ O ₃	265 (1500 К) 10 (1870 К)	2320	3990	4,2 (300 К)	7,5 (1270– 1870К)	5,2 (1670 К)
Al ₂ O ₃ + Si ₃ N ₄	2000 (300 К)	1750	2500	2,5 (300 К)	3,0 (300 К)	20 (300 К)
Ni+37%Cr+ 1%W+1%Ti (для сравнения)	400 (1070 К)	не более 1700	8800	2,18	16 (1070 К)	25,5 (1070 К)

9.2. Применение керамических материалов в горячих узлах и опорах ГТД

Для камер сгорания и турбин могут применяться:

- нитрид кремния,
- карбид кремния спеченный,
- теплозащитные покрытия на основе ZrO_2 с добавлением для стабилизации структуры 8% Y_2O_3 .

Из керамических материалов могут изготавливаться детали фронтальных устройств и жаровых труб камер сгорания, сопловые и рабочие лопатки, диски, корпуса турбин, цельные рабочие колеса микротурбин.

Для изготовления подшипников качения и их элементов (тел качения) может применяться нитрид кремния.

10. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

10.1. Определение, свойства, классификация

Композиционные материалы, композиты (сокращенно *КМ*) – это материалы, получаемые совмещением химически разнородных компонентов с четко выраженной поверхностью раздела (рис. 1).

Идея КМ взята из природы: естественные композиты – древесина, кости человека и млекопитающих. Древесина состоит из нескольких компонентов: волокон целлюлозы, хемицеллюлозы, пектина и матричного вещества – лигнина. Кости человека и животных состоят из коллагеновых (белковых) волокон, погруженных в минеральную матрицу (гидроксиапатит).

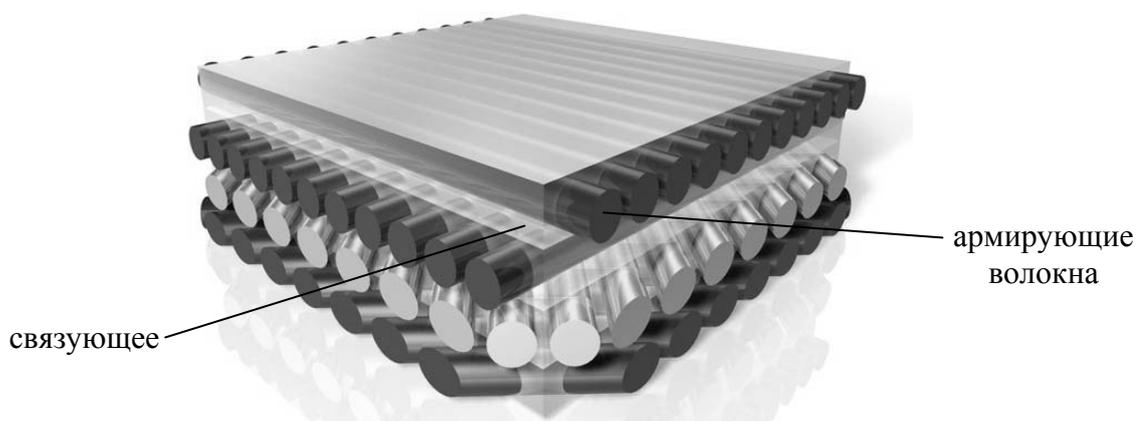


Рис. 1. Принципиальная схема многослойного КМ

Основная цель, которую преследуют инженеры при создании КМ – совместить в одном материала несколько таких материалов, которые будут компенсировать недостатки друг друга. В результате получается новый более совершенный материал, обладающий существенно более высокими свойствами, чем его компоненты по отдельности.

Один из ярких примеров искусственных КМ – железобетон. Основным недостатком бетона является его низкая прочность при растяжении. Этот недостаток компенсирует вводимая в бетон стальная арматура, имеющая высокое сопротивление растяжению. Сам бетон имеет прочность при растяжении не более $\sigma_p \leq 3$ МПа. Прочность при растяжении армированного бетона в среднем в 4–5 раз выше.

Различают три основных типа КМ:

1. Волокнистые (упрочняющий элемент – волокно, нить, проволока).
2. Слоистые (упрочняющий элемент – тонкий слой, пластина).
3. Дисперсно-упрочненные (упрочняющий элемент – частица, гранула).
4. Армированные короткими волокнами (кусочки волокон длиной 10–15 мм).

Волокнистый КМ состоит из:

- **матрицы**, которая предназначена для обеспечения монолитности материала и передачи и равномерного распределения усилий между армирующими волокнами;
- **армирующих волокон** (арматуры), которые воспринимают основную долю внешних нагрузок и обеспечивают прочность и жесткость.

По прочности и жесткости КМ превосходят обычные конструкционные материалы.

Преимущества КМ:

1. Высокие удельная прочность $\frac{\sigma_e}{\rho}$ и жесткость $\frac{E}{\rho}$.
2. Двойной эффект при использовании на вращающихся деталях:
 - а) снижение массы детали;

б) снижение массы всего узла из-за снижения нагрузок от центробежных сил на вал, опоры, подшипники.

3. Высокие демпфирующие характеристики.

4. Разрушение КМ происходит в виде расслаивания не носит катастрофического характера, а протекает во времени (вязкое разрушение); упрощается решение проблемы непробиваемости корпуса.

5. Армирующие волокна тормозят развитие трещин (рис. 2).

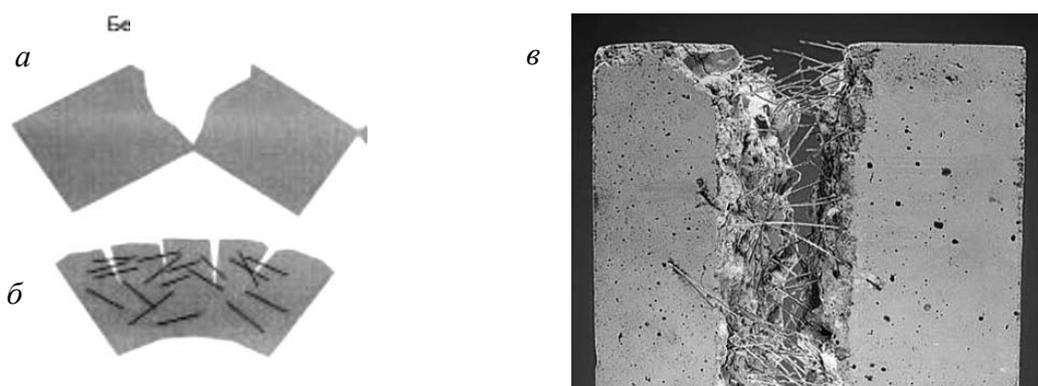


Рис. 2. Схема разрушения обычного неармированного материала и композита:

а – схема хрупкого разрушения неармированного материала;

б – схема разрушения армированного материала;

в – пример реального разрушения армированного волокнами КМ

Недостатки КМ:

1. Малая эрозионная стойкость.

2. Высокая стоимость и сложная технология производства армирующих волокон, особенно дороги монокристалльные волокна (усы), обладающие уникальными прочностными характеристиками.

3. Анизотропия упругих и прочностных свойств.

Свойства композиционного материала существенно зависят от:

– объемной доли армирующих волокон ψ_v (рис. 3, а); в реальных волокнистых композитах коэффициент армирования $\psi_v = 0,3 \div 0,7$;

– размера армирующих волокон (рис. 3, б);

– формы армирующих волокон (рис. 3, в);

– распределения армирующих волокон по композиту и равномерности их распределения (рис. 3, г);

– ориентации армирующих волокон (рис. 3, е).

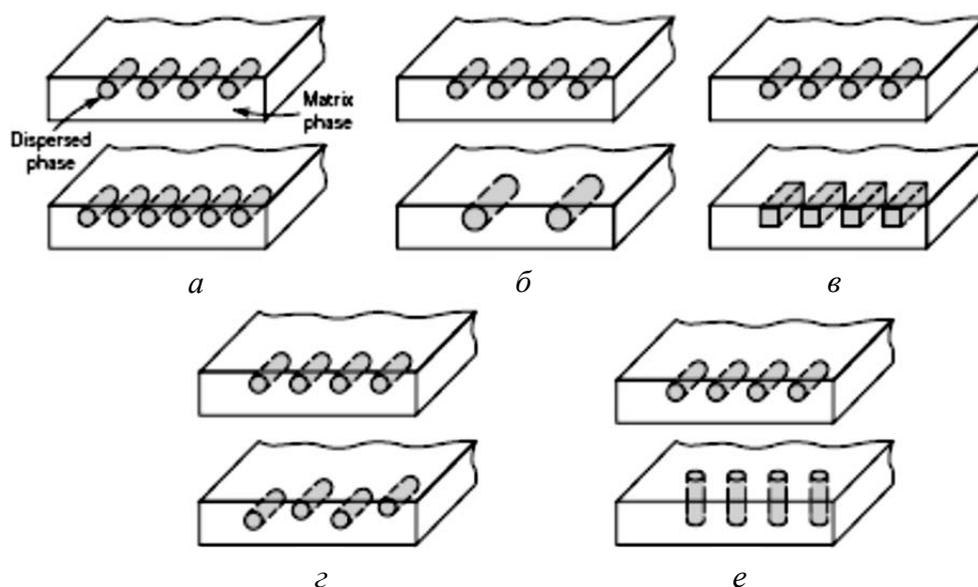


Рис. 3. Параметры армирующих волокон, влияющие на конечные свойства композита

В табл. 3 представлены основные механические свойства наиболее распространенных композитов по сравнению с традиционно используемыми в машиностроении металлическими материалами.

Таблица 3

Сравнение физико-механических характеристик ПКМ с традиционными конструкционными материалами

Материал	σ_B , МПа	E , ГПа	ρ , г/см ³	$\frac{\sigma_B}{\rho}$, км	$\frac{E}{\rho} \times 10^{-3}$, км
КМ на основе среднепрочного углеволокна (СПУ)	1900	135	1,6	118,8	8,4
КМ на основе высокопрочного углеволокна (ВПУ)	3000	154	1,6	187,5	9,6
КМ на основе высокомодульного углеволокна (ВМУ)	2400	230	1,6	150,0	14,4
КМ на основе стекловолокна (СВ-S)	870	40	1,8	48,3	2,2
Алюминиевый сплав Д16	450	73	2,7	16,7	2,7
Титановый сплав	950	110	4,5	21,1	2,4
Малоуглеродистая сталь 55	450	205	7,8	5,8	2,6
Нержавеющая сталь 10X17H13M2T	800	196	7,8	10,3	2,5
Быстрорежущая сталь P18	1241	197	7,8	15,9	2,5

10.2 Прогнозирование механических характеристик композитов композиционных материалов

Используя основные аналитические зависимости микромеханики композитов, можно прогнозировать их механические характеристики на основе свойств их компонентов.

Для изотропных материалов справедливо следующее соотношение между упругими характеристиками:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}. \quad (1)$$

В табл. 4 представлены основные механические характеристики наиболее часто используемых армирующих волокон.

Таблица 4

Механические характеристики армирующих волокон

Упругие и прочностные характеристики	Стекло-нить	Угленить	Органо-нить	Бороволокно (на вольфрамовой подложке)	Керамические волокна SiC (на вольфрамовой подложке)
E_{B1} , ГПа	70–80	300–700	130–140	300–400	350–450
E_{B2} , ГПа	70–80	9	130–140	-	-
G_{B12} , ГПа	24	12	20	100	-
ν_{B12}	0,22	0,15	0,25–0,35	0,11	-
$\bar{\sigma}_{B1}^+$, МПа	2500	2400–3500	2000–2500	3000–3500	1000–2000
$\bar{\epsilon}_B^+$, %	3,0–3,5	1,0	2–4	$\leq 1,0$	0,35–0,4
$\alpha_{B1} \cdot 10^6$, 1/°C	5–10	–0,5	2–3	7	4,8
$\alpha_{B2} \cdot 10^6$, 1/°C	5–10	5	2–3	-	-
ρ_B , г/см ³	2,45–2,55	1,7–1,9	1,44	2,7	3,2

Прочность при сжатии для волокон отсутствует по определению, т.к. воспринимать сжимающие нагрузки волокна могут только в составе композита. Поэтому для дальнейших вычислений в первом приближении можно принять $\bar{\sigma}_{B1}^- = \frac{\bar{\sigma}_{B1}^+}{2}$.

В табл. 5 представлены основные механические характеристики наиболее часто используемых полимерных матричных материалов.

Для пластичных материалов $\bar{\sigma}_m^+ = \bar{\sigma}_m^-$; для хрупких $\bar{\sigma}_m^- = (2 \div 3)\bar{\sigma}_m^+$; для сдвиговой прочности в первом приближении можно принять $\bar{\tau}_m = \frac{\bar{\sigma}_m^+}{2}$. Данные выражения справедливы для изотропного матричного материала.

10.2.1. Расчет упругих характеристик однонаправленного слоя.

Продольный модуль упругости однонаправленного слоя рассчитывается по формуле

$$E_1 = E_{в1}\psi_{в} + E_{м}\psi_{м}, \quad (2)$$

где $\psi_{в} = \frac{V_{в}}{V_{км}}$ – коэффициент армирования, равный отношению объема, занимаемого волокнами, ко всему объему композита; $\psi_{м} = 1 - \psi_{в}$.

Таблица 5

Механические характеристики матричных материалов

Упругие и прочностные характеристики	Термопластичные матрицы		Термореактивные матрицы		
	Полисульфоны (ПСФ-230)	Полиэтилен терефталат (лавсан)	Эпоксидная матрица (ЭД-20)	Полиимидная матрица (СП-97)	Фталонит-рильная матрица (PMR-15 и PN-3M)
E_m , ГПа	2,48–2,6	2,9–3,8	2,8–4,2	4	4,7–4,8
G_m , ГПа	-	-	0,8–1,5	-	-
ν_m	0,4	0,4	0,34–0,4	0,4	0,35–0,4
$\bar{\sigma}_m^+$, МПа	69–80	100–180	28–91	100	36–60
$\bar{\sigma}_m^-$, МПа	-	-	-	114	-
t_{max} , °С	230	245	120–170	300–350	400–450
$\alpha_m \cdot 10^6$, 1/°С	110	55–60	55	50	39–90
$\bar{\epsilon}_m^+$, %	10–20	12–50	2–6	5	-
ρ_m , г/см ³	1,24	1,38–1,4	1,2	1,2	1,347–1,336

Коэффициент Пуассона однонаправленного композита определяется по формуле

$$\nu_{12} = \nu_{B12}\Psi_B + \nu_M\Psi_M. \quad (3)$$

Здесь первый индекс показывает направление действия внешней силы, а второй – направление поперечной деформации.

Коэффициент Пуассона ν_{21} определяется из условия ортотропности однонаправленного слоя

$$\nu_{12} \cdot E_2 = \nu_{21} \cdot E_1. \quad (4)$$

Выражения для определения поперечного модуля упругости и модуля сдвига однонаправленного слоя, полученные по упрощенным формулам, выглядят следующим образом:

$$\frac{1}{E_2} = \frac{\Psi_B}{E_{B2}} + \frac{\Psi_M}{E_M}, \quad (5)$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{\Psi_B}{G_{B12}} + \frac{\Psi_M}{G_M}. \quad (6)$$

Выражения для определения поперечного модуля упругости и модуля сдвига однонаправленного слоя, полученные по моделям теории упругости для неоднородной среды, выглядят следующим образом:

$$E_2 = E_M \left[\frac{(1 + \zeta_E \Psi_B) E_{B2} + \zeta_E (1 - \Psi_B) E_M}{(1 - \Psi_B) E_{B2} + (\zeta_E + \Psi_B) E_M} \right], \quad (7)$$

$$G_{12} = G_M \left[\frac{(1 + \zeta_G \Psi_B) G_{B12} + \zeta_G (1 - \Psi_B) G_M}{(1 - \Psi_B) G_{B12} + (\zeta_G + \Psi_B) G_M} \right], \quad (8)$$

где ζ_E, ζ_G – коэффициенты влияния волокон на жесткость композита, определяемые экспериментально. В качестве первого приближения рекомендуется принять значения $\zeta_E = 2, \zeta_G = 1$.

Плотность однонаправленного слоя рассчитывается по формуле

$$\rho = \rho_{\text{с}} \Psi_{\text{с}} + \rho_{\text{м}} \Psi_{\text{м}}. \quad (9)$$

10.2.2. Расчет прочностных характеристик однонаправленного слоя.

Формула для определения предела прочности при растяжении при $\bar{\varepsilon}_{\text{м}}^+ > \bar{\varepsilon}_{\text{в}}^+$

$$\bar{\sigma}_1^+ = \bar{\sigma}_{\text{в1}}^+ \left(\Psi_{\text{в}} + \Psi_{\text{м}} \frac{E_{\text{м}}}{E_{\text{в1}}} \right), \quad (10)$$

$$\bar{\sigma}_1^+ = \bar{\sigma}_{\text{м1}}^+ \left(\Psi_{\text{м}} + \Psi_{\text{в}} \frac{E_{\text{в1}}}{E_{\text{м}}} \right) \text{ при } \bar{\varepsilon}_{\text{в}}^+ > \bar{\varepsilon}_{\text{м}}^+. \quad (11)$$

Основные уравнения для прочности слоя при сжатии имеют вид:

$$\bar{\sigma}_1^- = \bar{\sigma}_{\text{м1}}^- \left(\Psi_{\text{м}} + \Psi_{\text{в}} \frac{E_{\text{в1}}}{E_{\text{м}}} \right), \text{ при } \bar{\varepsilon}_{\text{в}}^- > \bar{\varepsilon}_{\text{м}}^-, \quad (12)$$

$$\bar{\sigma}_1^- = \bar{\sigma}_{\text{в1}}^- \left(\Psi_{\text{в}} + \Psi_{\text{м}} \frac{E_{\text{м}}}{E_{\text{в1}}} \right), \text{ при } \bar{\varepsilon}_{\text{в}}^- < \bar{\varepsilon}_{\text{м}}^-. \quad (13)$$

При определенном соотношении упругих характеристик матрицы и волокон формулы (12), (13) дают чрезмерно завышенные значения прочности. В этом случае рекомендуется воспользоваться

соотношением $\bar{\sigma}_1^- = \frac{\bar{\sigma}_1^+}{1,5}$.

Прочность однонаправленного слоя в поперечном направлении при соблюдении условия $E_{\text{в2}} > E_{\text{м}}$ определяется по формуле:

$$\bar{\sigma}_2^+ = \frac{\bar{\sigma}_{\text{м2}}^+}{K_{22}}, \quad (14)$$

$$\bar{\sigma}_2^- = \frac{\bar{\sigma}_{\text{м2}}^-}{K_{22}}, \quad (15)$$

где

$$K_{22} = \frac{1 - \psi_B \left(1 - \frac{E_M}{E_{B2}}\right)}{1 - \left(\frac{4\psi_B}{\pi}\right)^{0,5} \left(1 - \frac{E_M}{E_{B2}}\right)}. \quad (16)$$

Прочность однонаправленного слоя при внутрислойном сдвиге при соблюдении условия $G_{B12} > G_{M12}$ определяется по формуле:

$$\bar{\tau}_{12} = \frac{\bar{\tau}_{M12}}{K_{12}}, \quad (17)$$

где

$$K_{12} = \frac{1 - \psi_B \left(1 - \frac{G_M}{G_{B12}}\right)}{1 - \left(\frac{4\psi_B}{\pi}\right)^{0,5} \left(1 - \frac{G_M}{G_{B12}}\right)}. \quad (18)$$

В случае если $E_{B2} < E_M$ и $G_{B12} < G_M$, следует воспользоваться следующими приближенными зависимостями:

$$\bar{\sigma}_2^+ = (0,85 \div 0,95) \bar{\sigma}_M^+, \quad (19)$$

$$\bar{\sigma}_2^- = (0,85 \div 0,95) \bar{\sigma}_M^-, \quad (20)$$

$$\bar{\tau}_{12} = (0,85 \div 0,95) \bar{\tau}_M. \quad (21)$$

10.2.3. Расчет термоупругих характеристик однонаправленного слоя.

Формулы для расчета в первом приближении коэффициента линейного расширения однонаправленного композита имеют вид

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_{B1} E_{B1} \psi_B + \alpha_M E_M (1 - \psi_B)}{E_{B1} \psi_B + E_M (1 - \psi_B)}, \quad (22)$$

$$\alpha_2 = \alpha_{B2} \psi_B (1 + \nu_{B12}) + \alpha_M (1 - \psi_B) (1 + \nu_M) - \alpha_1 [\nu_{B12} \psi_B + \nu_M (1 - \psi_B)]. \quad (23)$$

Данные зависимости методов смесей пригодны для определения упругих и прочностных характеристик ПКМ для проектировочных расчетов изделий из КМ. По ним также можно прогнозировать упругие характеристики металломатричных композитов (МКМ), однако прочность в данном случае можно оценивать только экспериментально из-за существенного влияния технологических факторов при изготовлении МКМ.

10.3. Применение композиционных материалов

10.3.1. Общие сведения.

Основные группы КМ, соответствующие наиболее важным направлениям создания КМ для авиационных двигателей:

- полимерные композиционные материалы с рабочей температурой до 370–425°C;
- КМ на титановой матрице с рабочей температурой до 550°C, на матрице из интерметаллидов титана с рабочей температурой до 800°C;
- КМ с матрицей из никелевых сплавов или жаропрочных интерметаллидов с рабочей температурой до 1100–1300°C;
- керамические композиционные материалы (ККМ) с рабочей температурой до 1400–1700°C;
- углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) с надежной защитой от окисления до 1700–2000°C;
- новые типы армирующих высокотемпературных (до 2000–2200°C) волокна и матричные материалы для КМ следующих поколений.

В отличие от металлических материалов, процессы формирования композиционного материала и детали из него происходят *одновременно*.

Конструкция детали из композиционного материала может существенно *отличаться* от конструкции металлической детали.

10.3.2. Примеры применения КМ в узлах АД.

В компрессорах:

- лопатки вентиляторов и первых ступеней компрессоров низкого давления из полимерных композитов (углепластики);

- лопатки первой ступеней компрессоров высокого давления из металломатричных композитов (боралюминий, углеалюминий);
- корпуса компрессоров и панели шумоглушения из ПКМ;

В камерах сгорания:

- композит углерод – волокна карбида кремния (C-SiC),
- композит карбид кремния – волокна карбида кремния (SiC-SiC),
- композит кремний – волокна карбида кремния (Si-SiC) (при 1470К $\sigma_B=1000$ МПа).

В турбинах:

- композиционные материалы на основе жаропрочных и жаростойких сплавов, например никелевый сплав + углеволокно, $\rho = 5300$ кг/м³, $\sigma_B = 350$ МПа при 800°C, $t_{\text{раб}} = 950^\circ\text{C}$, низкий КТР (стабильные радиальные зазоры, применяется для корпусов турбин).

В соплах:

- МКМ никелевый сплав+угдеволокно, ККМ карбид кремния + угдеволокно.

10.3.3. Композиты системы углерод-углерод (УУКМ).

Для изготовления элементов, испытывающих в процессе эксплуатации высокие температуры (>2000К), тепловые удары, химические воздействия, в настоящее время используются композиционные материалы, представляющие собой углеродосодержащую матрицу (либо графитовую), армированную углеродным волокном.

УУКМ обладают высокой теплостойкостью, термopрочностью, стойкостью к тепловому удару и облучению, химической стойкостью, малой плотностью и целым рядом других ценных свойств, позволяющих применять их в термонагруженных конструктивных элементах.

Получение УУКМ.

Первый способ («Коксование органической смолы») заключается в том, что вначале создается заготовка углепластика на полимерной матрице, в качестве которой применяются органические смолы, дающие высокий коксовый остаток. Далее заготовку подвергают высокотемпературному воздействию в неокисляющейся среде (инертный газ) до температуры 1073К. В процессе высокотемпературного воздействия происходит термодеструкция

матрицы с образованием кокса (карбонизация), потеря массы, образование большого числа пор, снижение физико-механических свойств композита. Процесс карбонизации сопровождается удалением испаряющихся смолистых соединений и газообразных продуктов с образованием твердого кокса. Стадией карбонизации углепластика завершается процесс получения пористых, низкоплотных УУКМ. Для устранения пористости и повышения плотности карбонизированный материал вновь пропитывается связующим и карбонизируется. Этот цикл может повторяться до тех пор, пока не будет получен материал с необходимыми механическими свойствами.

Второй способ получения УУКМ заключается в *осаждении пироуглерода из газовой фазы*. Газообразный углеводород (метан, бензол, ацетилен и т.д.) диффундирует через углеволокнистый пористый армирующий каркас, где под действием температуры происходит разложение углеводорода на нагретой поверхности волокна. Осаждающийся углерод постепенно создает соединительные мостики между волокнами. Процесс осаждения проводится в вакууме или под давлением в индукционных печах или печах сопротивления при температуре 1173–1423К и давлении 130–2000КПа. Уменьшение температуры приводит к снижению скорости осаждения и увеличению продолжительности процесса. Увеличение температуры ускоряет осаждение пироуглерода, но при этом углеводородный газ не успевает диффундировать в объем заготовки и происходит поверхностное наложение углерода.

Пример применения УУКМ в турбине: рабочая лопатка из композиционного материала углерод-углерод ($\rho=1560 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_{\text{в}}=620 \text{ МПа}$ при $t=20^\circ\text{C}$). Прочность такой лопатки сохраняется до $t=2000^\circ\text{C}$. Для защиты от окисления поверхность насыщают кремнием, азотом, танталом (диффузионные покрытия).

УУКМ также перспективны для применения в реактивных соплах.

10.3.4. Перспективные армирующие волокна.

В качестве перспективного типа армирующих волокон рассматриваются нанотрубки – протяженные цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров

и длиной до нескольких сантиметров; состоят из одной или нескольких свернутых в трубку кристаллических плоскостей (рис. 4).

Прочность нанотрубок на разрыв составляет от 10 до 100 ГПа и более (у высокопрочных сталей 1...2 ГПа). Углеродные нанотрубки получают термическим распылением графитового электрода в плазме дугового разряда. Синтез осуществляется в камере, заполненной гелием с давлением 500 мм рт. ст. Стоимость 1 грамма нанотрубок – несколько сотен долларов.

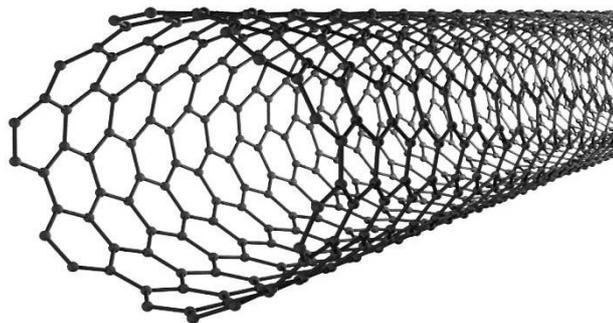


Рис. 4. Схема волокна в виде нанотрубки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном справочнике изложены основные сведения о составе, технологических и физико-механических свойствах материалов деталей АД – как используемых в настоящее время, так и перспективных. Даны рекомендации по применению этих материалов. Эта информация может быть использована при выполнении прочностных расчетов, расчетов массы и теплового состояния элементов АД в процессе курсового и дипломного проектирования.

В ряде случаев могут потребоваться дополнительные характеристики, которые отсутствуют в данном пособии. В такой ситуации рекомендуется использовать научно-техническую литературу (монографии, периодические издания, труды институтов, материалы конференций, диссертации и др.), а также интернет-ресурсы ведущих НИИ России, занимающихся проблемами разработки и применения материалов для элементов АД – ВИАМ и ЦИАМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирягин Л. П. и др. Промышленные цветные металлы и сплавы: справочник. М.: Металлургия, 1974. 489 с.
2. Гецов Л. Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. М.: Недра, 1996. 591 с.
3. Конструкционные и жаропрочные материалы для новой техники: сборник статей / под ред. Н. М. Жаворонкова. М.: Наука, 1978. 346 с.
4. Материалы деталей авиационных ГТД: методические указания к курсовому и дипломному проектированию / сост.: В. Ф. Харитонов; Уфимск. авиац. институт. Уфа: УГАТУ, 2004. 38 с.
5. Солонина О. П., Глазунов С. Г. Жаропрочные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1976. 258 с.
6. Белов А. Ф., Николенко В. В. Строение и свойства авиационных материалов: учеб. пособие. М.: Металлургия, 1989. 368 с.
7. Физико-химические свойства легких конструкционных сплавов / Б. А. Колачев и др. М.: Металлургия, 1995. 288 с.
8. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. М.: Металлургия, 1969. 750 с.
9. Интернет-сайт Всероссийского института авиационных материалов. URL: <http://www.viam.ru> (дата обращения: 14.05.2021)
10. Каримбаев Т. Д., Мыктыбеков Б. М. Разработка рекомендации по применению композиционных материалов в узлах и элементах АД: мат. конф. ЦИАМ по итогам работы за 5 лет. Т. 2. М.: ЦИАМ, 2005. С. 202–205.
11. Евдокимов С. А., Щеголева Н. Е., Сорокин О. Ю. Керамические материалы в авиадвигателестроении (обзор). 2018. № 12 (72) М.: ВИАМ. С. 54–61.
12. Каримбаев Т. Д. Создание деталей и узлов авиационных двигателей с применением композиционных материалов на основе инновационных решений // Вестник УГАТУ. 2019. Т. 23, № 2 (84). С. 33–43.
13. Каблов Е. Н., Лукин В. И. Интерметаллиды на основе титана и никеля для изделий новой техники – Автоматическая сварка. Киев, 2008, №11. С. 76–82.

14. Ломберг Б. С., Овсепян С. В., Бакрадзе М. М., М. Н. Летников, И. С. Мазалов. Применение новых деформируемых никелевых сплавов для перспективных ГТД – Авиационные материалы и технологии – М.: ВИАМ, 2017, №1, с. 116–129.

15. Основы механики, проектирования и технологии изготовления изделий из слоистых композиционных материалов: учеб. пособие / Ю. С. Первушин, В. С. Жернаков; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа, 2008. 303 с.

УСЛОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

Сокращения

АД – авиационный двигатель;

ВИАМ – Всероссийский институт авиационных материалов;

ГТД – газотурбинный двигатель;

КВД – компрессор высокого давления;

ККМ – композиционный материал с керамической матрицей;

КМ – композиционный материал;

ЛА – летательный аппарат;

МКМ – композиционный материал с металлической матрицей;

НИИ – научно-исследовательский институт;

ПКМ – композиционный материал с полимерной матрицей;

ЦИАМ – Всероссийский институт авиационного моторостроения.

Обозначения

σ_T – предел текучести, МПа.

σ_e – предел прочности (временное сопротивление), МПа.

σ_{100} – предел длительной прочности за 100 часов, МПа.

σ_{1000} – предел длительной прочности за 1000 часов, МПа.

σ_{10000} – предел длительной прочности за 10000 часов, МПа.

$\sigma_{0,2/100}$ – предел ползучести за 100 часов (напряжение, вызывающее остаточную деформацию 0,2 за 100 часов наработки), МПа.

$\sigma_{0,2/1000}$ – предел ползучести за 1000 часов, МПа.

σ_{-1} – предел выносливости при знакопеременном изгибе на базе $2 \cdot 10^7$ циклов для гладких образцов, МПа.

δ – относительное удлинение при кратковременных испытаниях на разрыв, в процентах.

ψ – поперечное сужение при кратковременных испытаниях на разрыв, в процентах.

E – модуль упругости, МПа.

G – модуль сдвига, МПа.

μ – коэффициент Пуассона.

ρ – плотность материала, кг/м³.

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К

α – коэффициент термического расширения, 1/К.

t_{\max} – максимальная температура применения сплава, °С.

НВ – твердость по Бринеллю, МПа.

t – температура, °С.

ψ_B – коэффициент объемного содержания волокон в композите (коэффициент армирования).

$\bar{\sigma}_M^+$ – кратковременная статическая прочность матрицы композиционного материала при растяжении, МПа.

$\bar{\sigma}_M^-$ – статическая прочность матрицы композиционного материала при сжатии, МПа.

$\bar{\tau}_M$ – статическая прочность матрицы композиционного материала при сдвиге, МПа.

E_{B1} – модуль упругости волокна в продольном направлении, ГПа.

E_{B2} – модуль упругости волокна в поперечном направлении, ГПа.

G_{B12} – модуль сдвига волокна в плоскости укладки слоя, ГПа.

ν_{B12} – коэффициент Пуассона волокна в плоскости укладки слоя, первый индекс показывает направление действия силы, второй – направление поперечного сужения.

$\bar{\sigma}_{B1}^+$ – кратковременная статическая прочность волокон композиционного материала при растяжении, МПа.

$\bar{\varepsilon}_B^+$ – предельное удлинение волокон композиционного материала при растяжении, %.

α_{B1} – коэффициент линейного термического расширения волокон в продольном направлении, 1/°С.

α_{B2} – коэффициент линейного термического расширения волокон в поперечном направлении, 1/°С.

ρ_B – плотность волокна, г/см³.

$\bar{\sigma}_{bl}^-$ – условная прочность волокон композиционного материала при сжатии, МПа.

ψ_m – коэффициент объемного содержания матрицы в композите.

E_m – модуль упругости матричного материала в композите, ГПа.

G_m – модуль сдвига матричного материала в композите, ГПа.

ν_m – коэффициент Пуассона матричного материала в композите.

α_m – коэффициент линейного термического расширения матричного материала в композите, $1/^\circ\text{C}$.

$\bar{\varepsilon}_m^+$ – предельное удлинение матричного материала при растяжении, %.

ρ_b – плотность матричного материала, г/см^3 .

E_1 – модуль упругости однонаправленного композита в направлении армирования, ГПа.

E_2 – модуль упругости однонаправленного композита поперек армирования, ГПа.

G_{12} – модуль сдвига однонаправленного композита в плоскости укладки слоя, ГПа.

ν_{12} – продольно-поперечный коэффициент Пуассона однонаправленного композита в плоскости укладки слоя.

ν_{21} – продольно-поперечный коэффициент Пуассона однонаправленного композита в плоскости укладки слоя.

$\bar{\sigma}_1^+$ – предел прочности однонаправленного композита при растяжении в направлении армирования, МПа.

$\bar{\sigma}_1^-$ – предел прочности однонаправленного композита при сжатии в направлении армирования, МПа.

$\bar{\sigma}_2^+$ – предел прочности однонаправленного композита при растяжении поперек армирования, МПа.

$\bar{\sigma}_2^-$ – предел прочности однонаправленного композита при сжатии поперек армирования, МПа.

$\bar{\tau}_{12}$ – предел прочности однонаправленного композита при сдвиге в плоскости укладки слоев, МПа.

α_1 – коэффициент линейного термического расширения однонаправленного композита в направлении армирования, $1/^\circ\text{C}$.

α_2 – коэффициент линейного термического расширения однонаправленного композита поперек армирования, $1/^\circ\text{C}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

Физико-механические свойства магниевых сплавов

Марка сплава	Термообработка (состояние сплава)	t	σ_T	σ_B	δ	$E \cdot 10^5$	σ_{100}	σ_{1000}	$\sigma_{0,2/100}$	$\sigma_{0,2/1000}$	σ_{-1}	ρ	μ
МЛ5	Отжиг	20	80	180	2	0,42	-	-	-	-	45	1810	0,34
МЛ5	Закалка	20	85	230	5	0,42	-	-	-	-	85	1810	-
		200	50	155	15	0,28	45	-	8	-	30	-	-
МЛ15	Искусственное старение	20	150	220	4	0,43	-	-	-	-	90	1830	0,34
		200	85	125	13	-	65	50	40	-	50	1830	-
МЛ9	Закалка + старение	20	120	250	6	0,43	-	-	-	-	60	1760	0,34
		200	-	195	20	-	135	115	95	75	50	-	-
		300	-	150	30	0,34	35	-	18	-	50	-	-
МЛ10	Закалка + старение	20	150	250	5	0,42	-	-	-	-	80	1780	0,33
		200	135	208	17	0,39	130	100	110	75	70	-	-
		300	125	190	19	0,35	25	35	32	10	40	-	-
МА8	Прессованная полоса	20	130	230	12	0,41	-	-	-	-	70	1780	0,30
		100	95	185	-	0,35	140	-	-	60	-	-	-
		200	55	125	-	0,28	75	-	-	-	-	-	-

Таблица П.2

Физико-механические свойства алюминиевых сплавов

Марка	Термообработка	t	σ_T	σ_B	δ	$E \cdot 10^5$	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1}	ρ	НВ	μ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
АЛ4М	Закалка + старение	20	300	360	4	0,75	-	-	90	2680	1100	0,32
		300	-	150	6	-	35	-	-	-	-	-
АЛ9	Закалка + старение	20	120	220	4	0,72	-	-	-	2660	650	-
		200	-	150	25	-	80	-	-	-	-	-
ВАЛ5	Закалка + старение	20	320	370	6	0,76	-	-	-	2630	1150	0,31
		200	-	230	5	-	90	80	-	-	-	-

Окончание табл. П.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
АЛ5	Закалка + старе- ние-	20	180	260	1	0,70	-	-	-	2680	800	-
		200	140	220	1	-	90	80	-	-	-	-
		300	80	130	4	-	35	24	-	-	-	-
АЛ19	Закалка + старе- ние	20	300	390	5	0,70	-	-	70	2750	1050	0,34
		200	220	280	3	-	150	120	-	-	-	-
		300	160	200	5	-	60	40				
АЛ21	Отжиг	20	160	210	1	0,70	-	-	70	2830	650	0,34
		300	100	140	1	-	80	50	-	-	-	
	Закалка + отжиг	20	205	240	1	0,70	-	-	75	2830	750	0,34
ВАЛ1	Закалка + старе- ние	20	180	280	2	0,70	-	-	75	2890	900	0,34
		300	100	160	3	0,55	90	60	40	-	-	-
		350	70	100	5	-	45	30	30	-	-	-
Амг6	отжиг	20	160	320	15	0,70	-	-	130	2650	-	0,31
	нагар- тован на 30%	20	345	435	11	0,70	-	-	-	2650	-	-
ВД-17	Закалка + старе- ние	20	340	520	17	0,72	-	-	-	2750	1150	-
		200	-	380	-	-	190	160	160	-	-	-
		250	-	-	-	-	100	75	75	-	-	-
АК4, АК4-1	Закалка + старе- ние	20	320	430	9	0,73	-	-	130	2770	1200	0,31
		200	-	310	13	-	200*	150**	-	-	-	-
		300	-	160	-	-	40	35	-	-	-	-
АК6, АК6-1	Закалка + старе- ние	20	290	410	10	0,72	-	-	130	2750	1050	-

* σ_{1000} (при 200°C) = 130 МПа** $\sigma_{0,2/1000}$ (при 200°C) = 90 МПа

Таблица П.3

Физико-механические свойства конструкционных сталей

Марка стали	Термообработка	t	σ_T	σ_B	δ	$E \cdot 10^{-5}$	σ_{200}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1}
38ХА	Закалка + отпуск	20	950	1050	-		-	-	500
		400	720	810	17	-	-	-	-
		600	220	240	32	-	-	-	-
60С2А	Закалка + отпуск	20	1450	1500	10	2,00	-	-	-
12Х2Н4А	Закалка + отпуск	20	800	1000	12	-	-	-	600
20ХН3А	Закалка + отпуск	20	850	1000	10	-	-	-	-
18Х2Н4ВА, 18Х2Н4МА (18ХНВА, 18ХНМА)	Закалка + отпуск	20	1100	1250	14	-	-	-	460
		400	980	1080	14	-	860	350	-
		550	720	770	16	-	220	80	-
33ХН3МА (ОХН3М)	Закалка + отпуск	20	870	970	19	-	-	-	-
		400	710	880	21	-	-	-	-
		600	460	490	25	-	-	-	-
38Х2МЮА (38ХМЮА)	Закалка + отпуск	20	850	1000	15	-	-	-	400
40ХН2МА (40ХНМА), 40ХН2ВА	Закалка + отпуск	20	950	1100	12	1,95	-	-	460
		400	790	970	17	-	-	-	-
		500	690	700	18	-	-	-	-
12Х2НВФА (ЭИ-712) 12Х2НМФА	Закалка + отпуск	20	960	1070	15	1,95			520
		400	-	960	16	1,56	-	-	-
		500	720	840	15	-	650	300	
30ХГСА	Закалка + отпуск	20	950	1100	14	2,00	-	-	-
		400	800	920	16	1,65	620	180	-
		550	500	550	27	1,55	120	27	-
14ХГСН 2МА (ЭП176)	Закалка + обработка холодом + отпуск	20	800	1000	12	-	-	-	600

Таблица П.4

Физико-механические свойства сплавов на основе меди

Марка сплава	Состояние сплава	t	σ_T	σ_B	$E \cdot 10^{-5}$	δ	НВ	ρ	λ	$\alpha \cdot 10^6$
Л63	Деформированное	20	270	450	1,00	20	1400	8500	121	19,0
ЛА67-2,5	Литое	20	-	350	-	15	900	8500	113	-
БрОФ6,5-0,15	Деформированное	20	500	650	1,10	18	1200	8850	71	18,0
БрАЖ9-4	Деформированное	20	300	550	1,16	20	1400	7450	78	18,0
БрАЖН10-4-4	Литое, закалка + отпуск	20		20		20		20		20
		400	350	400	350	400	350	400	350	400
БрАЖМц10-3-1,5	Литое, закалка + отпуск	20	220	550	1,05	20	1350	7500	59	16,0
БрХО,5	Деформированное	20	-	350	1,28	25	1000	8900	220	16,2
НМЖМц28-2,5-1,5	Деформированное	20	230	580	1,80	38	1600	8800	22	13,5
		500	180	400	-	28	-	-	36	15,8
БрБ2	Закалка + старение	20	1000	1250	1,33	2,5		8250	130	17,0
Бр019	Литое	20	250	320	0,98	0,3	1700	8600	-	19,8
БрОФ10-1	Литое	20	160	300	1,00	3,5	1200	8750	49	17,0
БрОС10-10	Литое	20	150	250	0,80	6	750	9100	45	19,2
БрСуН6-2 (ВБ-24Н)	Литое	20	150	330	1,05	7	900	8700	63	16,5

Таблица П.5.1

Физико-механические свойства титановых сплавов

Марка сплава	Термообработка	t	σ_T	σ_B	δ	$E \cdot 10^{-5}$	σ_{100}	σ_{1000}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1}	$\sigma_{0,2/1000}$	ρ	HV	μ
BT1-0	Отжиг	20	400	550	25	1,10	-	-	300	230	-	4520	1450	0,38
		300	160	220	30	0,78	160	-	120	180	-	-	-	-
OT4-1	Отжиг	20	600	750	20	1,10	-	-	-	360	-	4550	2200	-
		300	300	370	24	0,80	440	430	290	300	-	-	-	-
		400	270	340	17	0,75	290	270	190	200	-	-	-	-
		20	720	800	24	1,06	-	-	-	450	-	-	4400	2750
BT-5	Отжиг	300	430	500	25	0,87	480	-	420	320	-	-	-	-
		400	400	480	23	0,78	260	-	120	-	-	-	-	-
BT5-1	Отжиг	20	800	900	12	1,17	-	-	-	400	-	4420	2800	0,33
		350	480	570	22	0,81	-	540	380	350	-	-	-	-
		500	400	450	40	0,73	-	170	50	260	-	-	-	-
		20	680	780	6	1,18	-	-	-	250	-	-	4410	-
BT5Л	-	400	250	350	10	0,93	350	-	280	-	-	-	-	-
		20	920	1000	10	1,25	-	-	-	-	-	4430	-	0,32
BT-6	Отжиг	350	550	640	-	1,02	-	-	-	-	-	-	-	-
		500	500	620	-	0,92	-	-	-	-	-	-	-	-
BT-20	Отжиг	20	950	1025	10	1,25	-	-	-	-	420	4450	3000	0,33
		350	600	780	-	1,03	700	660	680	600	380	-	-	-
		500	500	700	-	0,92	480	300	-	170	360	-	-	

Таблица П.5.2

Физико-механические свойства титановых сплавов

Марка сплава	Термообработка	t	σ_T	σ_B	δ	$E \cdot 10^{-5}$	σ_{100}	σ_{2000}	$\sigma_{0,2/100}$	$\sigma_{0,2/1000}$	σ_{-1}	ρ	HV	μ	
BT3-1	Изотермический отжиг	20	1050	1100	11	1,15	-	-	-	-	530	4500	3300	0,30	
		200	730	900	9	1,11	-	-	-	-	-	-	-	-	
		300	650	830	10	1,08	820	810	640	640	490	490	-	-	-
		450	600	750	11	0,98	610	520	500	370	380	380	-	-	-
BT8	Закалка+старение	20	1150	1300	7	1,15	-	-	-	-	620	4500	-	-	
		300	850	1050	6	1,04	1040	1020	600	440	-	-	-	-	
		400	730	900	6	0,95	920	860	250	150	490	490	-	-	-
		20	950	1100	12	1,20	-	-	-	-	-	530	4480	3300	0,35
BT9	Двойной отжиг	450	630	800	12	0,95	730	610	480	300	-	-	-	-	
		500	570	750	12	0,90	530	320	250	100	440	440	-	-	-
		20	1200	1300	6	-	-	-	-	-	-	620	-	3370	-
		500	780	870	12	-	580	360	-	-	-	-	-	-	-
BT9Л	Закалка+старение	20	1200	1300	8	-	-	-	-	-	580	4510	3300	0,35	
		450	-	-	-	-	780	680	450	-	420	-	-	-	
		20	110	1200	10	1,20	800	800	610	610	540	540	4510	-	-
		450	660	810	8	1,06	780	680	500	480	-	-	-	-	-
BT9Л	Двойной отжиг	500	600	770	8	1,00	660	450	380	300	440	-	-	-	
		20	850	1000	8	1,03	-	-	-	-	180	4490	-	-	
		400	500	660	7	0,88	620	-	460	-	200	200	-	-	-
		500	490	640	8	0,82	500	400	280	200	180	180	-	-	-

Таблица П.5.3

Физико-механические свойства титановых сплавов

Марка сплава	Термообработка	t	σ_T	σ_B	δ	$E \cdot 10^{-5}$	σ_{100}	σ_{2000}	$\sigma_{0,2/100}$	$\sigma_{0,2/500}$	σ_{-1}	ρ
BT18	Отжиг	20	1050	1100	13	1,20	-	-	-	-	500	4540
		550	600	830	13	0,90	500	400 (500час)	210	120	440	-
		650	440	710	16	0,75	190	120 (500час)	70	30	-	-
BT18У	Отжиг	20	-	1150	13	-	-	-	-	-	-	4550
		550	-	-	-	-	560	-	230	-	-	-
BT-25	Отжиг	20	1100	1200	12	1,20	-	-	-	-	510	4620
		400	780	920	12	1,00	900	-	600	-	-	-
		500	700	830	12	0,90	730	600 (500час)	360	280	410	-
		600	650	690	12	0,85	240	-	70	-	-	-

Таблица П.6

Длительная прочность титановых сплавов в зависимости от параметра Ларсона-Миллера

Сплав	Предел длительной прочности, МПа										
	Параметр Ларсона-Миллера										
	14000	15000	16000	17000	18000	19000					
BT3-1	735	665	590	515	441	-					
BT-8	837	804	710	537	326	-					
BT-9	802	797	763	630	403	-					
BT-25	-	942	852	692	504	330					
BT-6	629	500	369	253	161	-					
BT-20	762	664	537	403	281	181					

Таблица П.7.1

Физико-механические свойства коррозионностойких, жаростойких и жаропрочных сталей

Марка сплава	Термообработка	t	σ_T	σ_B	δ	$E \cdot 10^{-5}$	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{10000}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1}	ρ	$\alpha \cdot 10^6$	
12X18H10T, 12X18H9T	Закалка	20	280	630	41	1,88	-	-	-	240	-	7910	17,0	
		400	180	450	31	1,55	-	-	-	-	-	-	19,4	
		600	180	400	25	1,40	250	180	130	120	80	-	-	20,8
		800	100	180	35	0,91	50	30	-	-	-	-	-	22,0
12X17Г9АН4 (ЭИ878)	Закалка; лист	20	390	780	65	2,00	-	-	-	-	320	7860	14,7	
		600	180	420	37	1,49	250	-	-	110	200	-	-	22,0
	Нагартован. лист	800	120	230	44	-	60	-	-	-	15	80	-	-
		20	1120	1300	20	1,95	-	-	-	-	-	-	-	-
20X23H18 (ЭИ417)	Закалка	600	660	780	7	1,49	-	-	-	-	-	-	-	
		20	330	690	49	-	-	-	-	-	-	7880	14,9	
		600	-	450	41	-	270	-	-	-	-	-	-	21,6
		800	-	210	56	-	70	-	-	-	-	-	-	22,8
13X11H2B2MФ (ЭИ961) 11X11H2B2MФ (ЭИ962)	Закалка + отпуск	900	-	100	75	-	30	-	-	-	-	-	-	23,4
		20	850	950	17	2,15	-	-	-	-	-	-	7820	11,0
		400	680	750	17	1,70	620	600	-	470	420	-	-	-
		500	570	650	23	1,45	44	390	-	300	340	-	-	-
37X12H8Г8МФБ (ЭИ481)	Закалка + 2-ступенч. старение	600	500	530	29	1,09	270	185	-	150	300	-	-	-
		20	630	1000	18	1,74	-	-	-	-	-	430	7850	15,3
		500	490	680	13	1,30	560	520	-	240	390	-	-	20,3
		600	460	620	12	1,24	450	360	-	230	370	-	-	19,8
		750	330	420	-	1,12	20	-	170	-	-	-	20,8	

Таблица П.7.2

Физико-механические свойства коррозионностойких, жаростойких и жаропрочных сталей

Марка сплава	Термооб- работка	t	σ_T	σ_B	δ	$E \cdot 10^{-5}$	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1}	ρ	$\alpha \cdot 10^6$
17X17H2 (ЭИ268)	Закалка + отпуск	20	770	960	-	-	-	-	-	7750	-
		450	730	920	-	1,62	690	80	-	-	-
		550	440	570	-	1,44	380	180	-	-	-
ХН38ВТ (ЭИ703)	Закалка	20	30	700	38	-	-	-	-	8170	13,0
		800	110	260	42	-	90	25	-	-	20,3
		900	60	150	48	-	45	-	-	-	20,8
		1000	40	90	49	-	-	-	-	-	-
12Х25Н16Г7АР (ЭИ835)	Закалка	20	350	800	40	1,94	-	-	-	7760	16,0
		800	-	300	-	1,04	100	-	-	-	19,4
		900	-	200	-	-	40	-	130	-	-
ЭП609	-	20	-	950	45	1,93	-	-	-	7770	11,9
		500	-	650	45	1,78	-	-	-	-	12,6
		600	-	470	45	1,68	-	-	-	-	12,9
ЭП718ИД	-	20	-	1230	44	2,00	-	-	-	8290	13,9
		600	-	1140	40	1,56	-	-	-	-	14,5
		700	-	980	17	1,49	-	-	-	-	14,9
		800	-	800	17	1,45	-	-	-	-	15,4
ЭП708ВД	-	20	-	1200	44	1,95	-	-	-	8550	12,0
		600	-	1030	40	1,56	-	-	-	-	12,7
		700	-	1000	17	1,45	-	-	-	-	13,1
		800	-	770	17	1,32	-	-	-	-	13,5

Таблица П.7.3

Физико-механические свойства коррозионностойких, жаростойких и жаропрочных сталей

Марка сплава	Термообработка	t	σ_T	σ_e	δ	$E \cdot 10^{-5}$	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{10000}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1}	ρ	$\alpha \cdot 10^6$	
ХН35ВТЮ (ЭИ787)	Закалка + старение	20	825	1250	21	-	-	-	-	-	-	7850	11,5	
		550	780	1140	19	-	700	630	560	-	-	-	-	15,8
		700	740	980	10	-	370	290	240	-	-	-	-	16,7
40Х15Н7Г7Ф2МС (ЭИ388)	Закалка + старение	20	625	1010	14	1,89	-	-	-	-	510	7800	17,1	
		600	510	700	10	1,44	310	290	-	230	380	-	-	23,3
		700	430	530	12	1,18	225	175	-	150	340	-	-	23,7
10Х11Н23Т3МР (ЭИ696М, ЭП33)	Закалка + двукратное старение	800	285	380	8	1,16	125	80	-	75	240	-	23,7	
		20	700	1000	10	1,86	-	-	-	-	-	7950	-	
		600	630	860	10	1,31	590	520	300	550	-	-	-	
13Х14Н3В2ФР (ЭИ736)	Закалка + отпуск	700	600	700	10	1,24	430	340	-	420	260	-	-	
		800	400	470	17	1,11	190	-	-	-	-	-	-	
		20	-	1200	7	-	-	-	-	900	500	7810	-	
		500	-	800	7	-	-	-	630	-	-	-		
		550	-	670	10	-	-	-	460	-	-	-		

Таблица П.8

Длительная прочность коррозионностойких, жаростойких и жаропрочных сталей

Предел длительной прочности, МПа										
Сплав	Параметр Ларсона-Миллера, $P \times 10^{-3}$									
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
ЭП718ИД	1050	1038	988	864	716	558	407	-	-	-
ЭП708ВД	-	-	-	-	640	565	434	313	213	136
										816
										461

Таблица П.9.1

Физико-механические свойства жаростойких сплавов на никелевой основе и на основе хрома

Марка сплава	Термообработка	t	σ_T	σ_B	δ	$E \cdot 10^{-5}$	σ_{100}	σ_{1000}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1}	ρ	λ	$\alpha \cdot 10^{-6}$	
ХН78Т (ЭИ435)	Закалка	20	280	750	27	1,95	-	-	-	-	8390	12,5	12,0	
		700	165	400	52	-	120	100	-	150	-	27,1	20,5	
		1000	-	70	95	-	-	-	5	-	-	-	33,2	-
ХН75МБТЮ (ЭИ602)	Закалка	20	400	850	42	1,94	-	-	-	-	8300	11,3	12,0	
		700	270	550	38	1,36	165	-	60	-	-	-	23,9	18,7
		900	-	175	70	-	29	-	-	-	-	-	29,3	20,0
ХН60ВТ (ЭИ868, ВЖ98)	Закалка	20	330	820	35	2,18	-	-	-	-	8380	9,6	12,7	
		800	210	400	33	1,76	120	80	35	150	-	-	25,5	16
		1000	70	130	50	1,53	40	15	5	-	-	-	30	16,8
ХН70Ю (ЭИ652)	Закалка	20	-	900	-	1,96	-	-	-	-	7900	-	-	
		800	-	370	12	0,95	120	-	-	-	-	-	-	-
		1000	-	100	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ХН33КВЮ (ВЖ145, ЭК102)	Закалка+ отпуск	20	590	880	60	1,93	-	-	-	-	800	10,2	13,1	
		900	-	250	55	0,98	80	-	-	-	-	-	25,6	18,6
		1000	-	-	-	0,72	35	-	-	-	-	-	28,0	18,7
		1100	-	-	-	-	16	-	-	-	-	-	-	-
		1200	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-

Таблица П.9.2

Физико-механические свойства жаростойких сплавов на никелевой основе и на основе хрома

Марка сплава	Термообработка	t	σ_T	σ_B	δ	$E \cdot 10^{-5}$	σ_{100}	σ_{1000}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1}	ρ	λ	$\alpha \cdot 10^{-6}$	
ХН58МБЮ (ВЖ159, ЭЖ171)	Закалка+ отпуск	20	540	930	30	2,05	-	-	-	-	8250	-	-	
		650	-	-	-	-	539 (50 час.)	-	-	-	-	-	-	
		850	-	390	40	-	175 (800°C)	-	-	-	-	-	-	-
		1000	-	-	-	-	25	-	-	-	-	-	-	-
ВХ2И		20		380	2	2,80	-	-	-	-	7200	-	7,0	
		800		300	30	2,45	160	-	-	-	-	-	-	9,0
		1200		180	30	2,05	30	-	-	-	-	-	-	11,5
ВХ4Л		20		780	10	2,41	-	-	-	-	-	-	9,8	
		800		560	13	1,85	206 (40 час)	-	-	-	-	-	-	14,0
		1200		110	20	1,11	15	-	-	-	-	-	-	16,4

Таблица П.10.1

Физико-механические свойства жаропрочных литейных сплавов на никелевой основе

Марка сплава	Термообработка	t	σ_T	σ_B	δ	$E \cdot 10^{-5}$	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{10000}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1}	λ	$\alpha \cdot 10^6$	ρ
ЖСЗ (ЭИ618)	Закалка	20	570	750	8	-	-	-	-	-	-	9,2	11,0	
		800	500	560	3	-	300	-	-	190	300	24,0	19,5	-
		900	310	400	4	-	100	-	-	80	230	27,3	24,0	-
ВЖЛ8	Закалка	700	640	740	5	-	600	-	-	-	-	-	-	
		800	600	620	6	-	340	220	120	-	-	-	-	-
		950	160	250	-	-	50	50	20	-	-	-	-	-
ХН67ВМТЮ (ЭП202)	-	20	630	720	8	2,10	-	-	-	-	-	13,0	10,4	
		750	460	560	13	1,85	-	-	-	-	-	28,0	13,8	-
ВЖЛ12У	-	20	-	90	6	-	-	-	-	-	-	-	-	7930
		800	-	-	-	-	525	380	-	-	-	-	-	-
		900	-	-	-	-	320	190	110	230	260	-	-	-
		1000	-	-	-	-	150	90	-	-	-	-	-	-
		1050	-	-	-	-	90	-	-	-	-	-	-	-
ЖС6К	Закалка	20	840	1020	2,5	-	-	-	-	-	270	-	-	8250
		800	820	920	2,0	1,75	520	400	250	370	-	-	23,0	15,7
		900	520	780	2,0	1,52	320	180	120	200	290	-	-	-
		1000	310	540	4,5	1,30	160	70	35	55	-	-	27,0	23,2
		1100	180	230	-	-	100	-	-	-	-	-	-	

Таблица П.10.2

Физико-механические свойства жаропрочных литейных сплавов на никелевой основе

Марка сплава	Термообработка	t	σ_T	σ_B	ψ	$E \cdot 10^{-5}$	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{10000}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1}	ρ	$\alpha \cdot 10^6$
ЖС6У	Закалка	20	890	980	6,0	2,00	-	-	-	-	-	8400	-
		800	880	980	3,0	1,57	530	-	-	-	-	-	-
		900	710	780	2,5	1,38	340	260	18	240	270	-	-
		1000	480	520	4,0	1,3	160	105	65	100	-	-	-
		1050	-	380	4,0	1,24	110	65	35	-	-	-	-
ЖС6Ф	Закалка	20	860	960	20,0	1,90	-	-	-	-	-	8600	-
		800	830	960	10,0	1,49	580	-	-	-	-	-	-
		900	780	870	13,0	1,31	360	250	-	280	260	-	-
		1000	550	620	15,0	1,24	180	-	-	120	-	-	-
		1050	420	480	20,0	1,18	120	-	-	-	-	-	-
ЖС26В СНК	Закалка	20	-	930	18,0	1,90	-	-	-	-	-	8570	11,9
		800	-	1030	22,0	1,49	-	-	-	-	-	-	13,6
		900	-	880	22,0	1,31	-	-	-	-	-	-	13,9
		1000	-	690	35,0	1,24	-	-	-	-	-	-	14,5
		1050	-	570	38,0	1,18	-	-	-	-	-	-	15,2
1100	-	420	44,0	1,10	-	-	-	-	-	-	-	15,8	
ЖС36	Закалка	900	-	-	-	-	480	360	-	-	-	-	-
		1000	-	-	-	-	255	165	-	-	-	-	-
		1100	-	-	-	-	149	90	-	-	-	-	-

Таблица П.10.3

Физико-механические свойства жаропрочных литейных сплавов на никелевой основе

Марка сплава	Термообработка	t	σ_6	ψ	$E \cdot 10^{-5}$	σ_{100}	σ_{1000}	ρ	$\alpha \cdot 10^6$
ЖС30	Закалка	20	980	11,5	1,40	-	-	8650	11,6
		900	1060	13,5	1,00	-	-	-	13,9
		1000	765	22,9	0,91	-	-	-	14,6
		1050	610	27,0	0,85	-	-	-	15,2
		1100	435	33,0	0,80	-	-	-	15,8
ЖС32ВНК	Закалка	20	1060	26,5	1,90	-	-	8760	12,4
		800	1050	15,5	1,49	-	-	-	14,6
		900	950	23,0	1,31	480	380	-	15,0
		1000	700	28,0	1,24	250	165	-	15,7
		1050	600	30,0	1,18	-	-	-	16,1
ВЖМ1		1100	480	29,5	1,10	125	75	-	16,6
		20	1190	-	-	-	-	9080	-
		900	-	-	-	585	450	-	-
		1000	-	-	-	330	215	-	-
		1100	-	-	-	165	95	-	-
ВЖМ4		20	1220	-	-	-	-	8870	-
		900	-	-	-	575	410	-	-
		1000	-	-	-	305	200	-	-
		1100	-	-	-	170	120	-	-
ВЖМ8	Закалка+отпуск	20	1100	-	-	-	-	-	-
		1100	-	-	-	180 (80 час)	-	-	-

Таблица П.11

Длительная прочность жаропрочных литейных сплавов на никелевой основе

Сплав		Предел длительной прочности, МПа												
		Параметр Ларсона-Миллера, $P \times 10^{-3}$												
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	
ЖС6У	683	649	588	507	417	326	243	173	117	75	46	27	-	
ЖС26ВСНК	816	763	683	585	481	378	285	205	142	94	59	36	-	
ЖС30	911	855	732	606	485	375	281	203	141	95	62	39	24	
ЖС6ФНК	816	724	625	525	429	341	264	198	145	104	72	-	-	
ЖС32	903	870	789	680	561	444	340	254	185	133	94	67	-	

74

Таблица П.12.1

Физико-механические свойства жаропрочных деформируемых сплавов на никелевой основе

Марка сплава	Термообработка	t	σ_T	σ_B	δ	$E \cdot 10^{-5}$	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{10000}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1}	ρ	λ	$\alpha \cdot 10^6$	
ХН51ВМТ ЮКФР (ЭП220)	Двухступенчатая закалка + старение	20	730	1000	10	2,26	-	-	-	-	-	8380	7,9	12,0	
		800	-	910	7	1,88	480	370	240	350	330	-	-	21,4	30,1
		900	390	680	8	-	270	190	90	300	300	-	-	23,5	23,4
		950	320	420	9	-	200	110	50	260	220	-	-	-	24,7

Таблица П.12.2

Физико-механические свойства жаропрочных деформируемых сплавов на никелевой основе

Марка сплава	Термообработка	t	σ_T	σ_B	δ	$E \cdot 10^{-5}$	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{10000}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1}	ρ	λ	$\alpha \cdot 10^6$
ХН77ТЮР (ЭИ437Б)	Закалка + старение	20	700	1080	20	2,1	-	-	-	-	370	8200	19,3	12,7
		600	640	950	26	1,63	700	340	-	400	310	-	26,4	20,0
		700	600	870	22	1,45	420	150	-	250	290	-	29,4	21,0
		800	470	560	18	1,24	200	-	-	140	260	-	32,7	24,8
ХН62МВКЮ (ЭИ867)	Закалка + старение	20	800	1150	20	2,03	-	-	-	-	-	-	13,8	11,5
		800	690	910	8	1,58	430	240	180	340	310	8570	23,0	14,5
		900	440	600	11	1,41	200	100	40	115	300	-	24,3	15,5
		1000	180	290	18	1,20	75	-	-	-	-	-	-	-
ХН56ВМКЮ (ЭП109, ЭИ867А)	Закалка + старение	800	750	1050	6	1,60	440	390	220	380	-	8450	-	-
		950	440	580	8	1,34	160	100	35	90	-	-	-	-
		1000	300	400	10	-	85	60	-	-	-	-	-	-
		20	690	1100	35	2,19	-	-	-	-	-	-	8640	-
ХН56ВМТЮ (ЭП199)	Закалка + старение	800	660	750	6	1,76	290	160	-	-	250	-	-	-
		950	260	330	16	-	65	25	-	-	-	-	-	-
		20	680	1050	32	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		700	580	810	26	-	-	380	300	-	360	-	-	-
ХН65ВМТЮ (ЭИ893)	Закалка + старение	800	540	750	22	-	-	180	110	-	360	-	-	-
		20	725	1100	14	1,86	-	-	-	-	350	8420	17,2	12,1
		700	670	930	8	1,59	500	350	-	300	380	-	27,6	16,3
		800	580	760	5	1,52	280	210	130	170	360	-	30,2	16,9
ХН70ВМТЮ (ЭИ617)	Двухступенчатая закалка + старение	900	440	470	9	1,30	140	80	-	80	260	-	33,5	17,7

Таблица П.12.3

Физико-механические свойства жаропрочных деформируемых сплавов на никелевой основе

Марка сплава	Термообработка	t	σ_T	σ_B	δ	$E \cdot 10^{-5}$	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{10000}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1}	ρ	λ	$\alpha \cdot 10^6$	
ХН75ВМЮ (ЭИ827)	Закалка + старение	800	580	810	10	-	-	-	-	290	300	8480	-	-	
		900	450	570	10	-	-	-	-	-	100	300	-	-	
ХН70ВМТЮБ (ЭИ598)	Закалка + старение	20	700	1050	16	-	-	-	-	-	-	8430	10,1	12,0	
		700	590	900	13	-	470	370	220	280	370	-	-	21,7	20,4
		900	270	370	14	-	200	90	-	80	180	-	-	26,1	29,0
ХН70ВМТЮФ (ЭИ826)	Закалка + старение	20	720	1050	10	2,00	-	-	-	-	-	8420	-	-	
		700	670	960	12	1,55	570	420	350	500	380	-	-	-	-
		900	410	540	14	1,36	180	120	-	100	300	-	-	-	-
ЖС6-КП	Закалка + отжиг	20	800	1250	10	2,00	-	-	-	-	-	8200	-	-	
		800	750	1000	10	1,57	470	360	-	390	390	-	-	-	-
		900	450	750	10	1,27	280	150	-	340	360	-	-	-	-
		1000	250	470	8	1,15	130	70	-	240	-	-	-	-	-
ХН73МБТЮ (ЭИ698ВД)	Закалка + старение	20	740	1220	16	2,00	-	-	-	-	-	8320	-	11,0	
		500	700	1160	20	1,75	-	-	-	-	-	-	-	-	12,4
		600	670	1120	23	1,64	720	580	-	-	-	-	-	-	12,7
		700	650	1040	20	1,45	500	400	280	-	-	-	-	-	13,4
ЭК151ИД	-	800	580	730	10	1,37	400	220	200	-	-	-	-	13,9	
		20	1120	1510	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ЭК152ИД	-	650	-	-	-	-	1030	-	-	-	-	-	-	-	
		20	1240	1600	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ЭК152ИД	-	650	-	-	-	-	1050	-	-	-	-	-	-	-	
		20	1240	1600	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица П.12.4

Физико-механические свойства жаропрочных деформируемых сплавов на никелевой основе

Марка сплава	Термообработка	t	σ_B	δ	$E \cdot 10^{-5}$	σ_{100}	σ_T	ρ	$\alpha \cdot 10^6$
ЭП742ИД	Закалка + старение	20	1320	19	2,05	-		8320	12,1
		500	1255	16	1,93	-		-	13,2
		600	1225	15	1,87	-	750	-	13,4
		700	1120	17	1,80	830	при 650 °С	-	13,9
		800	860	19	1,70	-		-	14,3
ЭП741П	Закалка + старение	20	1375	32	2,11	-		8380	12,1
		500	1140	35	1,89	-	750 при 650 °С	-	13,5
		700	1040	37	1,80	900		-	13,9
		800	925	30	1,75	-		-	14,2
		20	1300	15	1,93	-		8350	11,5
ЭП741НП	Закалка + старение	500	1290	18	1,73	-	900 при 650 °С	-	12,9
		700	1210	17	1,64	1000		-	13,7
		800	1000	15	1,60	-		-	14,1
		20	1510	8	1,02	-		8280	11,9
ЭП962П	Закалка + старение	500	1500	7	1,82	-		-	13,2
		600	1490	7	1,73	-	1200	-	13,5
		700	1400	8	1,60	1050	при 650 °С	-	13,8
		20	1380	19	-	-	$\sigma_{0,2}=1010$	8470	-
ЭП975А-ИД	-	750	1080	23	-	735	$\sigma_{0,2}=880$	-	-
		850	1390 при 20°С	-	-	450	1050 при 20°С	-	-
		950	20°С	-	-	259		-	-

Таблица П.12.5

Физико-механические свойства жаропрочных деформируемых сплавов на никелевой основе

Марка сплава	Термообработка	t	σ_b	δ	$E \cdot 10^{-5}$	σ_{100}	σ_r	ρ	$\alpha \cdot 10^6$
ХН29К28ВМТ (ВЖ171)	Закалка+отпуск	20	870	10	-	-	-	8650	-
		900	-	-	-	130	-	-	-
		1000	-	-	-	70	-	-	-
		1100	-	-	-	45	-	-	-
		1200	-	-	-	23	-	-	-
ХН56К16МБВ ЮТ (ВЖ172)	Закалка+отпуск (холоднокатанный лист)	20	1460	25	-	975 при 600°C.	$\sigma_{0,2} = 1050$	-	-
		700	-	-	-	630	-	-	-
ХН50ВМТЮБ (ЭП648)		20	930	-	-	-	$\sigma_{0,2} = 345$	-	-
		800	-	-	-	176 (30 час.)	-	8720	-
		1000	-	-	-	29	-	-	-

78

Таблица П.13

Длительная прочность жаропрочных деформируемых сплавов на никелевой основе

Предел длительной прочности, МПа									
Сплав	Параметр Ларсона-Милера, $P \times 10^{-3}$								
	17	18	19	20	21	22	23	24	25
ЭИ698ВД	1050	980	890	775	640	501	373	252	164
ЭП742ИД	1178	1130	1039	915	772	624	483	358	254
ЭП741П	1153	1125	1063	973	864	743	619	500	392
ЭП741НП	1360	1301	1205	1083	945	800	656	523	404
ЭП962П	1410	1349	1259	1091	923	749	583	435	313

Таблица П.14

Физико-механические свойства интерметаллидных сплавов

Марка сплава	Термообработка	t	σ_T	σ_B	δ	$E \cdot 10^{-5}$	σ_{100}	σ_{1000}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1}	ρ	λ	$\alpha \cdot 10^6$
ВКНА-4У	-	20	-	1340	-	-	-	-	-	-	7840	-	-
		1100	-	-	-	-	110	-	-	-	-	-	-
		1200	-	-	-	-	50	-	-	-	-	-	-
ВКНА-1В	-	1100	-	-	-	-	100	35	-	120	7930	-	-
		1200	-	-	-	-	45	23	-	-	-	-	-
ВИН2	-	20	-	1400	8	-	-	-	-	-	8120	-	-
		975	-	-	-	-	290 (40 час)	-	-	-	-	-	-
		1100	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-
ВИТ1	-	20	-	1150	4	1,35	-	-	-	600	5300	-	-
		650	-	950	12	-	430	-	-	-	-	-	-
ВТИ-4	-	20	-	1100	5	1,3	-	-	-	500	5150	-	-
		650	-	880	12	-	350	-	-	-	-	-	-

Учебное издание

Авторы-составители: ХАРИТОНОВ Валерий Федорович
СОЛОВЬЕВ Павел Владимирович

МАТЕРИАЛЫ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Учебный справочник
по дисциплине «Конструкция и проектирование
авиационных двигателей и энергетических установок»

Компьютерная верстка *А. А. Шарипова*

Подписано в печать 25.06.2021. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 5,0. Тираж 15 экз. Заказ № 64.
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»
Отпечатано с готового оригинал-макета
450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12.