

Турбореактивный двигатель. Элементы конструкции



Материалы, применяемые для изготовления элементов ГТД

Продолжение табл. 1.1

Основные сборочные единицы ГТД	Основные элементы сборочных единиц	Используемые материалы	Термическая обработка	Способ получения исходных заготовок и конструкций
Задняя опора, силовой агрегат (ЗО)	Корпус задней опоры	13X11H2B2MФ, X15H5D2T, X77TЮР (ЭИ-437Б) XН77TЮР-ВД (ЭИ-437Б-ВД)	З+О	ХШ, Св, СБК
Выхлопное устройство	Наружная оболочка	X18H9T	З, Вз	ХШ, Св, СБК
	Форсажная камера	X18H9T, ВЖ98, ВЖ102	З, Вз	ХШ, Св, СБК
	Реактивное сопло	ВЖ98, ВЖ102	З, Вз	ХШ, Св, СБК
Агрегаты двигателя	Корпусные детали	AK4-1, AK6, AK8, BT3, BT9	З, С ОТЖ	Л, Ш
	Шестерни	1X18H9T, 38XMЮA, 40X1MA, 40XН2МА-Ш	Н, Ц, З+О Н, Аз, З+О Н, З+О	Ш
Топливная, воздушная, масляная системы	Трубопроводы	1X18H9T, X17H13MЗБ	Н, Ц, З+О	Пр
	Компенсаторы	1X18H9T	Н, Ц, З+О	Ш
	Крепежные элементы	1X18H9T	Н, Ц, З+О	Ш

Примечание. Условные обозначения: З – закалка; О – отпуск; ОН – отпуск низкий; ОВ – отпуск высокий; ОТЖ – отжиг; СТ – старение; Н – нормализация; Сб – стабилизация; ВЗ – охлаждение на воздухе; Ц – цементация; Аз – азотирование; ХШ – холодная штамповка; Л – литье; Ш – штамповка; Св – сварка; СБК – Сборная конструкция; Р – раскатка; ВАЛ – вальцовка; ИЗШ – изотермическая штамповка; ТОШ – точная штамповка; ВСШ – высокоскоростная штамповка; Л – литье; ЛНК – литье с направленной кристаллизацией; МКО – монокристаллическая отливка; Пр – прокат,

Материалы, применяемые для изготовления элементов ГТД

Таблица 1.1 – Материалы, применяемые для изготовления элементов ГТД

Основные сборочные единицы ГТД	Основные элементы сборочных единиц	Используемые материалы	Термическая обработка	Способ получения исходных заготовок и конструкций
Входной направляющий аппарат (ВНА)	Наружная оболочка	38ХА, 38Х2МЮА	3+О, ОН, ОВ	ХШ
	Корпус ВНА	АМЦ, Д16	ОТЖ, 3+СТ	Л, Ш
Компрессор низкого давления (КНД)	Наружная оболочка	38Х2МЮА, 13Х3Н13М2Ф	3+О, ОН	ХШ, Св, С6К
	Корпус компрессора	30Х13 15Х16Н2АМ 30ХГСА 13Х11Н2В2МФ	ОТЖ, 3+О II+ОВ 3+О ОТЖ, 3+О	Р ХШ, Св, С6К
	Статорные лопатки	1Х12Н9, Х15Н5Д2Т, ВТ-20, ВТ-9	Н+ОВ, Н+О ОТЖ	ВАЛ ИЗШ, ТОШ, ВСШ
	Роторные лопатки	ВТ-9 ВТ-20 ЭП-517, ЭП-718ИД	ОТЖ ОТЖ 3+О	ИЗШ, ОШ ИЗШ, ВСШ Ш, ВАЛ
	Диски	ВТ-9 ВТ-20	ОТЖ ОТЖ	Ш Ш
	Лабиринтные ушлотнения	18ХНВА, 40ХНМА 13ХН14ВФРА Х24Н25Т	II+ОВ 3-О 3-О	Ш III Ш
Корпус средней опоры (КСО)		АЛ-4, АВТ1	3-С	Л

Материалы, применяемые для изготовления элементов ГТД

Таблица 1.1 – Материалы, применяемые для изготовления элементов ГТД

Основные сборочные единицы ГТД	Основные элементы сборочных единиц	Используемые материалы	Термическая обработка	Способ получения исходных заготовок и конструкций
Входной направляющий аппарат (ВНА)	Наружная оболочка	38ХА, 38Х2МЮА	3+О, ОН, ОВ	ХШ
	Корпус ВНА	АМЦ, Д16	ОТЖ, 3+СТ	Л, Ш
Компрессор низкого давления (КНД)	Наружная оболочка	38Х2МЮА, 13Х3Н13М2Ф	3+О, ОН	ХШ, Св, С6К
	Корпус компрессора	30Х13 15Х16Н2АМ 30ХГСА 13Х11Н2В2МФ	ОТЖ, 3+О Н+ОВ 3+О ОТЖ, 3+О	Р ХШ, Св, С6К
	Статорные лопатки	1Х12Н9, Х15Н5Д2Т, ВТ-20, ВТ-9	Н+ОВ, Н+О ОТЖ	ВАЛ ИЗШ, ТОШ, ВСШ
	Роторные лопатки	ВТ-9 ВТ-20 ЭП-517, ЭП-718ИД	ОТЖ ОТЖ 3+О	ИЗШ, ОШ ИЗШ, ВСШ Ш, ВАЛ
	Диски	ВТ-9 ВТ-20	ОТЖ ОТЖ	Ш Ш
	Лабиринтные уплотнения	18ХНВА, 40ХНМА 13ХН14ВФРА Х24Н25Т	Н+ОВ 3+О 3+О	Ш Ш Ш
Корпус средней опоры (КСО)	АЛ-4, АВТ1	3+С	Л	

Материалы, применяемые для изготовления элементов ГТД

Продолжение табл. 1.1

Основные сборочные единицы ГТД	Основные элементы сборочных единиц	Используемые материалы	Термическая обработка	Способ получения исходных заготовок и конструкций
Компрессор высокого давления (КВД)	Наружная оболочка	38Х2МЮА 13Х3Н13М2Ф 15Х16Н2АМ	3+О, ОН ХТО 3+О	ХШ, Св, С6К
	Корпус компрессора	15Х16Н2АМ 30ХГСА 13Х11Н2В2МФ Х15Н5Д2Т	Н+ОВ 3+О 3+О 3+О	Р ХШ, Св, С6К
	Статорные лопатки	1Х17Н2 Х15Н5Д2Т ВТ-9 ЭП-517, ЭП-718ИД ЖС6УВИ	3+О 3+О ОТЖ 3+О 3+О	Ш, ВСШ, ИЗШ, ВАЛ
	Роторные лопатки	ВТ-20 ЭП-517, ЭП-718ИД	ОТЖ 3+О	ИЗШ, ВСШ Ш, ВАЛ
	Диски	ВТ-9 ВТ-20	ОТЖ ОТЖ	Ш Ш
	Лабиринтные уплотнения	18ХНВА, 40ХНМА 13ХН14ВФРА Х24Н25Т	Н+ОВ 3+О 3+О	Ш Ш Ш

Материалы, применяемые для изготовления элементов ГТД

Продолжение табл. 1.1

Основные сборочные единицы ГТД	Основные элементы сборочных единиц	Используемые материалы	Термическая обработка	Способ получения исходных заготовок и конструкций
Камера сгорания (КС)	Наружный кожух	X18H9T, ВЖ98, ВЖ102	З, Вз	XIII, Св, С6К
	Жаровая труба	X77TЮР (ЭИ-437Б) XН77TЮР-ВД (ЭИ-437Б-ВД) XН77TЮРУ-ВД (ЭИ437БУВД) XН78Т (ЭИ-435) XН80ТБЮ (ЭИ-607)	З+С6	XIII, Св, С6К
Турбина	Наружная оболочка	XН77TЮРУ-ВД (ЭИ437БУВД) XН78Т (ЭИ-435) XН80ТБЮ (ЭИ-607) ЖС6У-ВИ	З+С6	XIII, Св, С6К
	Корпус турбины	XН80ТБЮ (ЭИ-607) ЖС6У-ВИ	З+С6	XIII, Св, С6К
	Статорные лопатки	XН80ТБЮ (ЭИ-607) ЖС6У-ВИ, ЖС6ФВИ	З+С6	XIII, Св, С6К

Материалы, применяемые для изготовления элементов ГТД

Продолжение табл. 1.1

Основные сборочные единицы ГТД	Основные элементы сборочных единиц	Используемые материалы	Термическая обработка	Способ получения исходных заготовок и конструкций
Турбина	Роторные лопатки	ХН77ТЮРУ-ВД (ЭИ437БУВД) ХН78Т (ЭИ-435) ХН80ТБЮ (ЭИ-607) ЖС-3, ЖС6-К, ЖС6У-ВИ ЖС6Ф-ВИ, ЖС-40 ЖС-30ВИ, ЖС-30	3+С6	Ш, ЛНК, МКО
	Диски	ХН77ТЮРУ-ВД (ЭИ437БУВД) ХН80ТБЮ (ЭИ-607) ХН62БМКТЮ-ПД	3+С6	Шзш
	Лабиринтные кольца	ВЖЛ-14, ВЖЛ12У	3+Вз	Ш
Вал	Вал низкого давления	15Х12Н2МВДАБ-Ш	Н, 3+О	Ш
	Вал высокого давления	15Х12Н2МВДАБ-Ш	Н, 3+О	Ш
	Подшипники			С6К
Задняя опора, силовой агрегат (ЗО)	Наружная оболочка	Х18Н9Т, ВЖ98, ВЖ102	3, Вз	ХШ, Св, С6К

Материалы, применяемые для изготовления элементов ГТД

Продолжение табл. 1.1

Основные сборочные единицы ГТД	Основные элементы сборочных единиц	Используемые материалы	Термическая обработка	Способ получения исходных заготовок и конструкций
Задняя опора, силовой агрегат (ЗО)	Корпус задней опоры	13X11H2B2MФ, X15H5Д2Т, X77ТЮР (ЭИ-437Б) XН77ТЮР-ВД (ЭИ-437Б-ВД)	З+О	ХШ, Св, СБК
Выхлопное устройство	Наружная оболочка	X18H9Т	З, Вз	ХШ, Св, СБК
	Форсажная камера	X18H9Т, ВЖ98, ВЖ102	З, Вз	ХШ, Св, СБК
	Реактивное сопло	ВЖ98, ВЖ102	З, Вз	ХШ, Св, СБК
Агрегаты двигателя	Корпусные детали	AK4-1, AK6, AK8, BT3, BT9	З, С ОТЖ	Л, Ш
	Шестерни	1X18H9Т, 38XMЮА, 40XНМА, 40XН2МА-Ш	Н, Ц, З+О Н, Аз, З+О Н, З+О	Ш
Топливная, воздушная, масляная системы	Трубопроводы	1X18H9Т, X17H13M3Б	Н, Ц, З+О	Пр
	Компенсаторы	1X18H9Т	Н, Ц, З+О	Ш
	Крепежные элементы	1X18H9Т	Н, Ц, З+О	Ш

Примечание. Условные обозначения: З – закалка; О – отпуск; ОН – отпуск низкий; ОВ – отпуск высокий; ОТЖ – отжиг; СТ – старение; Н – нормализация; Сб – стабилизация; Вз – охлаждение на воздухе; Ц – цементация; Аз – азотирование; ХШ – холодная штамповка; Л – литье; Ш – штамповка; Св – сварка; СБК – Сборная конструкция; Р – раскатка; ВАЛ – вальцовка; ИЗШ – изотермическая штамповка; ТОШ – точная штамповка; ВСШ – высокоскоростная штамповка; Л – литье; ЛПК – литье с направленной кристаллизацией; МКО – монокристаллическая отливка; Пр – прокат,

Материалы, применяемые для изготовления элементов ГТД

Лопатки роторной и статорной части ГТД работают в различных температурных условиях.

На входе в компрессор температура находится в пределах $-50^{\circ} \dots -60^{\circ}\text{C}$, в зоне последних ступеней компрессора высокого давления он достигает $600 \dots 700^{\circ}\text{C}$. На лопатки ротора и статора компрессора оказывают влияние силы потока воздуха от скорости полета летательного аппарата изменение усилий сжатия на каждой из рабочих ступеней компрессора. Центробежные силы, возникающие в роторе компрессора, создают значительные нагрузки на рабочие элементы лопаток.

Лопатки ротора турбины и сопловых направляющих аппаратов работают при весьма значительных силовых и температурных нагрузках. Поток газовой смеси, которая воспламеняется в камере сгорания, подается на рабочие лопатки турбины и создает высокие температурные и силовые нагрузки. Температура на входе в турбину равна $T_r = 1300 \text{ K}$, а максимальная $T_{r \text{ max}} = 1550 \dots 1600 \text{ K}$ [3]. Такие температуры требуют создания специальной системы охлаждения колес турбины и нанесения на перо лопатки высокотемпературного барьерного покрытия. Исходя из этого материал, применяемый для изготовления лопаток роторной и статорной части ГТД, имеет различные характеристики по химическому составу и механической прочности.

В табл. 3.2 представлен перечень основных материалов, применяемых для лопаток ГТД (по мере развития).

С целью уменьшения массы двигателя в роторе компрессора низкого и среднего давлений используются высокотехнологичные жаропрочные титановые сплавы с температурой в рабочей ступени колеса до 500°C .

Наиболее высокие требования предъявляют к материалу лопаток, работающих в зоне турбины ГТД. Вначале использовались хромоникелевые сплавы, которые подвергались деформированию методом горячей штамповки (ЭИ437Б, ЭП867, ЭП929 и др.), а после создания конструкции лопаток турбины с охлаждаемой полостью – хромоникелевые литейные сплавы ЖС-3, ЖС6-К, ВЖЛ-12у и др.

Материалы, применяемые для изготовления элементов ГТД

5.11. Материалы, применяемые для деталей компрессоров

Выбор материалов компрессора осуществляется исходя из свойств материала в рабочих условиях эксплуатации. Деталь, изготовленная из выбранного материала, должна удовлетворять нормам прочности при заданных надежности и ресурсе.

5.11.1. Характеристики применяемых материалов

В компрессоре применяются четыре основные группы материалов:

- алюминиевые сплавы – в диапазоне температур, не превышающих 250 °С;
- титановые сплавы – в диапазоне температур, не превышающих 500 °С;
- стали и жаропрочные сплавы – в диапазоне температур, превышающих 450...500 °С;
- полимерные композиционные материалы – в диапазоне температур, не превышающих 150...250 °С.

Некоторые свойства перечисленных материалов приведены в табл. 5.1.

5.11.1.1. Титановые сплавы

В настоящее время наиболее широко в мировой практике применяются в конструкции компрессоров титановые сплавы. Титановые сплавы при сравнительно небольшой плотности ($\approx 4,5 \text{ г/см}^3$ против $\approx 7,8...8,3 \text{ г/см}^3$ у сталей) обладают сопоставимым со сталями пределом прочности. Поэтому, заменяя стальные детали на титановые, можно получить заметное снижение массы компрессора, а значит, и всего двигателя в целом.

В то же время необходимо учитывать, что с увеличением рабочей температуры механические свойства титановых сплавов заметно падают. Кроме этого, титановые сплавы чувствительны к концентраторам напряжений, как заложенным в конструкции детали, так и появившимся в результате нарушения технологического процесса при изготовлении. Немаловажным фактором является также возможное нарушение температурного режима при изготовлении и эксплуатации деталей из титановых сплавов. Все перечисленное может привести к заметному снижению сопротивления усталости.

Еще одним фактором, который необходимо учитывать при проектировании деталей из титановых сплавов, является так называемый «титановый пожар». Это явление возникает при продолжительном непрерывном контакте двух взаимно подвижных поверхностей из титановых сплавов. При этом детали разогреваются и про-

исходит их сварка и даже возгорание. Для того чтобы освободиться от такого явления, на одну из деталей, находящихся в зоне вероятного контакта, следует нанести прирабатываемое покрытие. В некоторых случаях даже принимают решение изготовить одну из деталей из другого материала, в том числе из стали, хотя это и ведет к увеличению массы конструкции.

5.11.1.2. Алюминиевые сплавы

Алюминиевые сплавы обладают еще меньшей массой – $2,65...2,85 \text{ г/см}^3$. Однако их механические свойства и диапазон рабочих температур значительно ниже, чем сталей и титановых сплавов, что резко снижает область их применения. Препятствием для применения таких сплавов также является сравнительно низкая коррозионная стойкость. Материал требует применения специальных эмалевых или других покрытий для предотвращения коррозии.

5.11.1.3. Стали и жаропрочные никелевые сплавы

Эти материалы являлись бы оптимальными для изготовления деталей компрессора, поскольку они обладают наилучшими механическими свойствами, самым широким среди рассматриваемых материалов диапазоном рабочих температур, высокими эрозийными и коррозионными свойствами. Все это обусловило их полное доминирование на раннем этапе существования ГТД. Однако задача обеспечения минимальной массы может решаться только применением более легких материалов.

5.11.1.4. Полимерные композиционные материалы

В настоящее время в авиадвигателестроении все шире применяются ПКМ, обладающие относительно высокими механическими свойствами при сравнительно низкой удельной массе (табл. 5.1). До недавнего времени главным ограничением их применения являлись невысокие рабочие температуры до 100 °С, но за последний год этот предел достиг 250 °С (для стеклонастиков), а для отдельных новых материалов и 350 °С.

ПКМ состоит из двух основных компонентов: связующего (синтетической смолы) и волокнистого наполнителя (ткань или однонаправленный жгут из угле-, органико- или стекловолокна). Наполнитель воспринимает основные нагрузки, а связующее формирует из отдельных частей наполнителя (ткани, жгута, ленты) единое целое и обеспечивает распределение нагрузки. Узлы из ПКМ можно армировать металлическими элементами. Таким образом, готовый узел можно

Материалы, применяемые для изготовления элементов ГТД

Свойства материалов, применяемых в компрессорах ГТД

Материал	Плотность ρ , кг/см ³	Коэффициент линейного расширения, α			Предел прочности при растяжении σ_B , МПа	Модуль упругости E , МПа
		100°C	200°C	400°C		
ПКМ	1,4...1,9				900... 1100	18000... 22000
Алюминиевые сплавы	2,65...2,85	1,0016	1,0039	1,0087	360...380	70000...72000
Титановые сплавы	4,4...4,55	1,0007	1,016	1,0037	950...1200	110000...115000
Стали	7,8...8,3	1,0012	1,0031	1,0068	900...1000	190000...220000

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

•

