

ВВЕДЕНИЕ

На машиностроительных предприятиях большое внимание уделяется вопросам интенсификации производственных процессов, в том числе повышению эффективности механообрабатывающих производств. Несмотря на широкое применение оборудования с ЧПУ, в том числе и многоцелевого, за последние десятилетия наблюдается устойчивая тенденция роста трудоемкости механической обработки. Так, для ряда изделий авиационной техники объемы станочных работ превысили 30% от общей трудоемкости изготовления планера [1, 2], причем свыше 70% от общей трудоемкости станочных работ приходится на фрезерование. При этом имеет место следующее распределение объемов фрезерных работ: 80...90% – концевое фрезерование, в том числе и малкованными (угловыми, хвостовыми) фрезами, до 10% – торцовое, а остальное приходится на дисковые, грибковые и специальные фрезы.

Рост трудоемкости механической обработки является следствием все расширяющегося применения труднообрабатываемых материалов, таких как титановые сплавы и высокопрочные стали, а также крупногабаритных конструкций крыла и фюзеляжа (панелей длиной до 27...30 м), в том числе и из высокопрочных материалов.

Объемы применения конструкционных материалов в процентах от общей массы планера по данным [3, 4] приведены в таблице 1.

Таблица 1

Объемы применения конструкционных материалов в планере

Изделие	<i>Объемы применения материалов в % от массы планера</i>			
	Титановые сплавы	Алюминиевые сплавы	Стали	Прочие материалы, в том числе ПКМ
ИЛ86	14	54	15	17
В747	4,25	68	10	17,75
F14	24,4	39	17	19,6
F15	26,7	35,5	3,3	34,5
F18	11,7	47,7	15	25,6
B1	22,5	41,3	18,5	27,7
B787	16	20	10	54
F22	24	35	5	36
Миг25	8	11	80	–
Миг31	16	33	50	1
B1B	17,6	42,5	7	23

Динамика изменения объемов применения титановых сплавов и высокопрочных сталей в зависимости от года разработки изделий приведена на рисунке 1.

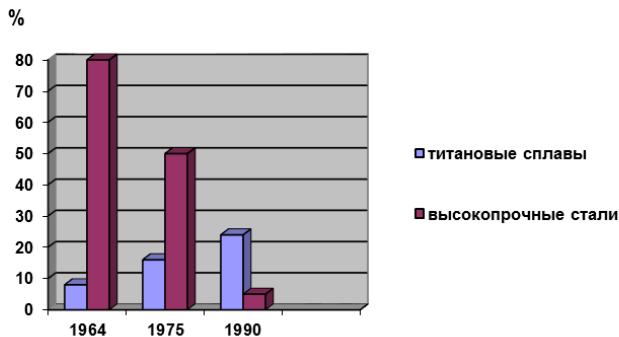
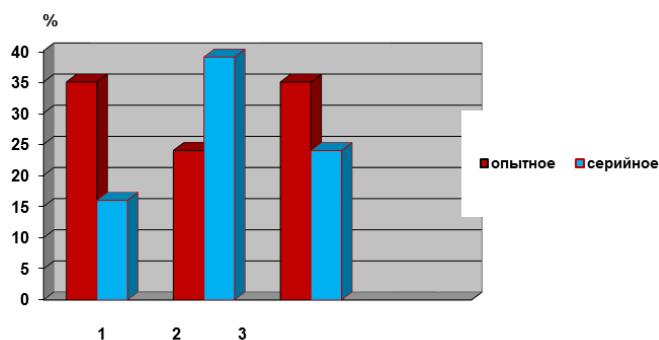


Рис. 1. Объемы применения титановых сплавов и высокопрочных сталей в конструкциях изделий в зависимости от года их разработки на примере МиГ-25 (1964), МиГ-31 (1975) и F22 (1990)

Таков же характер изменения объемов применения титановых сплавов и для изделий гражданского применения, так, в конструкции планера широкофюзеляжного самолета разработки 1960 гг. (В747) применено 4,25% титановых сплавов, а в более поздних разработках, например ИЛ86 и В787, соответственно 14 и 16%.

В настоящее время темп роста объемов применения алюминиевых сплавов и высокопрочных сталей несколько снизился из-за расширяющегося применения композиционных материалов, но следует ожидать дальнейшего увеличения объемов применения титановых сплавов из-за склонности к коррозии сплавов алюминия при их непосредственном контакте в композиционными материалами на основе углерода. Заслуживает внимания тот факт, что в процессе испытаний и доводки постановочной партии F22 произошло значительное изменение процентного соотношения применяемых материалов [3] в сторону увеличения объемов применения труднообрабатываемых материалов (см. рис. 2).



*Рис. 2. Изменение объемов применения в конструкции планера материалов при переходе от опытного до серийного изделий:
1 – алюминиевые сплавы, 2 – титановые сплавы, 3 – композиционные материалы.*

Это объясняется недостаточной эксплуатационной надежностью высоко-нагруженных, крупногабаритных деталей из ПКМ. Так, по данным [3], лонжероны крыла из ПКМ в процессе доводки изделия были заменены на титановые.

Развитие механообрабатывающих производств и в первую очередь самолетостроительных заводов идет по пути дальнейшего увеличения парка станков с ЧПУ, в том числе и многокоординатных. Еще в 1960–1970 гг. на заводах создавались цеха станков с ЧПУ преимущественно фрезерных групп. Так, только одним отраслевым станкостроительным заводом было выпущено до 1990 г. свыше 35 000 единиц оборудования с ЧПУ, в том числе и типа обрабатывающий центр [5]. На предприятиях других отраслей объемы применения станков с ЧПУ несопоставимы с авиационной промышленностью, но их применение, несомненно, будет увеличиваться для обеспечения производства конкурентоспособной продукции не только по качеству, но и по себестоимости. Широкое применение станков с ЧПУ, а в дальнейшем создание на их базе автоматизированных цехов и производств выдвигают новые требования к их инструментообеспечению.

Высокая стоимость часа работы современных многоцелевых станков с ЧПУ диктует необходимость обеспечения высокой интенсивности съема металла. Интенсификация режимов обработки по сравнению с работой на универсальном оборудовании может быть обеспечена применением экономических периодов стойкости для современных инструментальных материалов. С физической точки зрения целесообразность применения экономических периодов стойкости вытекает из основного уравнения теории резания металлов:

$$T_1^m V_1 = T_2^m V_2 = \text{const},$$

где T – программируемые периоды стойкости;

V – расчетные скорости резания;

m – показатель относительной стойкости.

Из уравнения следует, что для удаления одного и того же объема металла необходимы разные промежутки времени. Естественно, что при меньших временных затратах технологическая себестоимость будет ниже. С учетом того, что в инструментальном магазине можно установить необходимое количество дублеров инструмента, время на их смену будет минимальным, дополнительно следует учесть, что весь инструмент настроен на размер с необходимой точностью. Это исключает необходимость вмешательства оператора для корректировки положения инструмента в наладочном режиме. Единственным препятствием для использования в качестве критерия экономической стойкости является отсутствие зависимостей, позволяющих определить, находится ли скорость резания, соответствующая периоду экономической стойкости, на участке нормального износа, или при высокой скорости резания наступит катастрофический износ. Это усугубляется тем, что в каталогах на импортный режущий инструмент приводится рекомендуемый диапазон скоростей резания для усредненных условий работы, а для отечественного инструмента для труднообрабатываемых материалов стойкостные зависимости для оборудования с ЧПУ не

систематизированы и приведены, как правило, в нормативных материалах отраслевых технологических институтов. Необходимо отметить, что для новых конструкционных материалов рекомендации по выбору инструментальных материалов и назначению режимов резания практически отсутствуют. В связи с этим вопросы разработки нормативных материалов по выбору инструментальных материалов, конструкций режущих и вспомогательных инструментов, а также назначению рациональных режимов резания являются актуальными.

Дополнительно необходимо отметить, что на предприятиях сформирована смешанная структура инструментообеспечения. Это выражается в том, что для обеспечения работы предприятия применяется как покупной, так и инструмент собственного изготовления.

Весь применяемый режущий инструмент подразделяется на:

- общего применения;
- специализированный;
- специальный.

Инструмент общего применения выпускается инструментальными заводами (фирмами) по стандартам Российской Федерации (ГОСТ), Европейского союза (DIN), мировым (ISO), а также техническим условиям предприятий. Его применяемость не зависит от выпускаемых изделий. Он привязан только к обрабатываемым материалам общего применения.

Специализированный инструмент может изготавливаться как на специализированных предприятиях, так и в цехах подготовки производства по отраслевым стандартам, стандартам предприятий и конструкторской документации. Он применяется для обработки типовых для данной отрасли материалов и конструктивных элементов деталей.

Специальный инструмент предназначен для формообразования конструктивных поверхностей на нескольких деталях или только на одной. Его изготовление, как правило, выполняется в цехах подготовки производства по конструкторской документации. Обоснованное применение специализированного и специального инструментов позволяет значительно повысить эффективность технологических операций. Время на смену инструмента на современных технологических комплексах (многоцелевых станках) не превышает нескольких секунд, а общие затраты на инструмент в технологической себестоимости деталей находится в пределах 3...7% [6, 7].

То же самое можно отнести и к вспомогательному инструменту. Для него характерно деление на вспомогательный инструмент общего применения и специализированный. Широкое применение оборудования с ЧПУ нового поколения диктует требования пересмотра технической документации как инструмента общего применения, так и специального с учетом изменения требований по точности и конструкции присоединительных мест.

Необходимо отметить, что объемы применения инструмента собственного изготовления достаточно велики, что связано с большой номенклатурой специализированного и специального инструмента и относительно небольшой потребностью, что усложняет размещение заказов на его изготовление на специализированных предприятиях.

Для обеспечения возможности изготовления инструмента необходимо наличие инструментальных цехов с полным циклом технологического оборудования. Кроме того, желательно приобретение необходимого сортамента металлопродукции из инструментальных материалов для его изготовления. Так, например, отечественные металлургические заводы поставляют инструментальные материалы в виде проката нормальной, повышенной и высокой точности (серебрянку) следующих форм: круг, квадрат, прямоугольник. Для сверл предусмотрен специальный прокат с двумя отверстиями для подвода СОЖ. Зарубежные металлургические заводы имеют более широкую номенклатуру поставляемых полуфабрикатов для изготовления инструмента, а именно: листы из быстрорежущих сталей и термообработанные столбики для изготовления фрез методом вышлифовки по целому. Необходимо отметить, что заготовки могут поставляться по заданным квалитетам точности. Применение термообработанных заготовок значительно снижает продолжительность производственного цикла изготовления инструмента, так как процесс термической обработки быстрорежущих сталей весьма продолжителен.

Твердосплавные заготовки поставляются в виде напайных пластин, неперетачиваемых пластин и столбиков твердых сплавов для изготовления осевых конструкций инструмента. Столбики могут быть как шлифованные, так и нешлифованные. Кроме того, они могут иметь отверстия для подвода СОЖ как для инструментов с прямыми зубьями, так и с винтовыми.

Дополнительно необходимо обратить внимание на то, что рядом предприятий выпускаются заготовки с окончательно обработанными хвостовиками типов NC, MAS-BT, HSK, CAPTO, что значительно снижает трудоемкость изготовления сборных конструкций фрез больших диаметров.

ГЛАВА 1

ОБРАБАТЫВАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Для производства летательных аппаратов находят применение следующие группы конструкционных материалов.

1. Алюминиевые сплавы.

Алюминиевые сплавы, в свою очередь, подразделяются на:

- алюминиевые сплавы, не упрочняемые термообработкой;
- литьевые алюминиевые сплавы;
- спеченные алюминиевые сплавы;
- высокопрочные алюминиевые сплавы;
- алюминиевые сплавы средней прочности;
- высокоресурсные Al сплавы;
- алюминиево-литиевые сплавы;
- жаропрочные алюминиевые сплавы.

2. Магниевые сплавы.

Сплавы магния подразделяются на:

- деформируемые магниевые сплавы;
- литьевые магниевые сплавы.

3. Бериллиевые сплавы.

Сплавы бериллия подразделяются на:

- деформируемые сплавы;
- литьевые сплавы.

4. Титановые сплавы.

Титановые сплавы подразделяются на следующие группы:

- конструкционные титановые сплавы;
- жаропрочные титановые сплавы;
- интерметаллидные титановые сплавы;
- литьевые.

5. Легированные стали.

6. Высокопрочные стали.

7. Высокопрочные нержавеющие стали.

8. Дисперсионно-твердеющие стали.

9. Жаропрочные сплавы.

10. Композиционные материалы с полимерной матрицей.

Композиционные материалы с полимерной матрицей делятся на:

- углепластики;

- стеклопластики;
- органопластики;
- боропластики;
- гибридные.

11. Металлослоистые композиционные материалы.

12. Композиционные материалы с металлической матрицей.

1.1. Алюминиевые сплавы

Алюминиевые сплавы, не упрочняемые термообработкой, находят широкое применение для изготовления деталей внутреннего набора, имеют высокую пластичность, хорошо свариваются, прочность сварных соединений составляет 0,9...0,95 от прочности основного материала. Сплавы, легированные скандием, имеют прочность, близкую к прочности сплава Д16ч, и обладают эффектом сверхпластичности ($\delta = 500\ldots1000\%$). Физико-механические характеристики алюминиевых сплавов, не упрочняемых термообработкой, приведены в таблице 1.1 [8...10].

Таблица 1.1

Алюминиевые сплавы, не упрочняемые термообработкой

Марка материала	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль упругости Е, МПа	Плотность, г/см ³
АМг2	135	67 500	2,68
АМг3	190	66 700	2,67
АМг5	255	69 600	2,64
АМг6	315	69 600	2,64

Литейные алюминиевые сплавы предназначены для изготовления деталей, обладающих небольшой массой и высокой удельной прочностью, что позволяет в ряде случаев применять отливки взамен поковок и штамповок. При этом повышается коэффициент использования металла (КИМ) и снижается трудоемкость изготовления деталей. Физико-механические характеристики литейных алюминиевых сплавов приведены в таблице 1.2 [8...10].

Таблица 1.2

Литейные алюминиевые сплавы

Марка материала	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль упругости Е, МПа	Плотность, г/см ³
АЛ4МС	360...400	70 000	2,65
ВАЛ12	≥ 550	70 000	2,8
ВАЛ14	380...500	70 000	2,8
ВАЛ16	≥ 240	70 000	2,8
ВАЛ18	380...500	70 000	2,8
ВАЛ20	≥ 420	70 000	2,8

Спеченные алюминиевые сплавы САП применяются в основном для изготовления малонагруженных деталей, работающих при температурах до 500°C, а САС – для деталей, где необходим минимальный коэффициент линейного расширения при эксплуатации в типовом температурном диапазоне. Физико-механические характеристики спеченных алюминиевых сплавов приведены в таблице 1.3 [8...10].

Таблица 1.3

Спеченные алюминиевые сплавы

Марка материала	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль упругости Е, МПа	Плотность, г/см ³
САП1	300	72 000	2,7
САП2	350	77 000	2,7
САП3	400	77 000	2,71
САП4	446	80 000	2,7
СПАК-4	450	72 500	2,80
САС1-400	260...280	80 000	2,73
САС1-50	340...360	–	2,7
ПВ90	780	–	2,90
1419	380	–	2,78
1549	470...530	–	–

Сплавы САП формируются спеканием алюминия с окисью алюминия Al₂O₃ чешуйчатой формы. Содержание окиси в зависимости от марки сплава находится в пределах от 3 до 16%. Данные материалы формально можно рассматривать как композиционные материалы с металлической матрицей. Разновидностью САПа является сплав СПАК-4 (системы Al–Cu–Mg–Al₂O₃), в котором упрочнение алюминиевой матрицы выполнено оксидами (Al₂O₃) и интерметаллидами. Сплав СПАК4 может применяться для работающих на форсированных режимах поршнях.

Сплавы САС спекаются из гранул алюминия размерами 400 и 50 мкм, применяются в приборостроении.

Высокопрочные алюминиевые сплавы применяются в основном в виде катаных, прессованных и прессовано-штамповочных полуфабрикатов длиной до 27...30 м для верхних обшивок крыла и других силовых элементов планера. Физико-механические характеристики высокопрочных алюминиевых сплавов приведены в таблице 1.4 [8...10].

Таблица 1.4

Высокопрочные алюминиевые сплавы

Марка материала	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль упругости Е, МПа	Плотность, г/см ³
В96Ц3пч (1965-1)	≥ 615...645	70 600	2,89
В95оч	500...540	70 600	2,75

Продолжение табл. 1.4

Марка материала	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль упругости E , МПа	Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$
1933	450...520	69 600	2,83
В96Ц, В96Ц1	670...700	70 600	2,89
В93	520	70 900	2,84
1973	500...549	—	2,85
1963	500...560	72 000	2,78
В1977	650...680	—	—

Данные материалы имеют склонность к короблению и чувствительны к концентраторам напряжений, с учетом этого их обработку необходимо выполнять в строгом соответствии с инструкциями ВИАМ 1021 и НИАТ по обеспечению минимальных короблений и необходимого ресурса.

Алюминиевые сплавы средней прочности применяются в основном в виде катаных, прессованных и прессовано-штамповочных полуфабрикатов обшивок и других силовых элементов планера. Физико-механические характеристики алюминиевых сплавов средней прочности приведены в таблице 1.5 [8...10].

Таблица 1.5

Алюминиевые сплавы средней прочности

Марка материала	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль упругости E , МПа	Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$
Д16Т	400...490	70 000	2,78
Д19Т	480	69 000	2,76
В91-Т3	450	—	—
В1341	360	—	—
В1579	339	—	2,662
В1370Т1	420...450	70 000	—

Высокоресурсный алюминиевый сплав 1163 [8...10] (термическое состояние Т, Т7) имеет временный предел прочности сплав $\sigma_b \geq 420...460$ МПа характеризуется высокими трещиностойкостью и усталостной прочностью. Плотность сплава $2,78 \text{ г}/\text{см}^3$. В настоящее время является основным материалом для обшивок фюзеляжа и низа крыла. Выпускается с твердой регламентированной плакировкой из сплава АД35 толщиной 1,5–2,5% (обозначение 1163РДТВ) вместо 2–6% в листах базового сплава 1163АТ. Рекомендован к применению взамен сплава Д16.

Алюминиево-литиевые сплавы характеризуются пониженной плотностью и более высоким модулем упругости по сравнению с другими сплавами алюминия. Их применение обеспечивает снижение массы изделий. Физико-механические характеристики алюминиево-литиевых сплавов приведены в таблице 1.6 [8–10].

Таблица 1.6

Алюминиево-литиевые сплавы

Марка материала	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль упругости E , МПа	Плотность, г/см ³
1420-ТГ1	420...450	78 000	2,47
1424-ТГ1	430...450	80 000	2,54
1441-Т1	410...430	80 000	2,6
1461-Т1	550...600	79 500	2,63
1464	500...600	78 000...80 000	2,67
1468	500...600	78 000...80 000	2,67
1469	580...600	78 000...80 000	2,67

Жаропрочные алюминиевые сплавы применяются в виде плит, листов, штамповок в конструкциях деталей планеров современных летательных аппаратов, работающих при повышенных температурах. Физико-механические характеристики жаропрочных алюминиевых сплавов приведены в таблице 1.7 [8...10].

Таблица 1.7

Жаропрочные алюминиевые сплавы

Марка материала	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль упругости E , МПа	Плотность, г/см ³
АК6	420	72 000	2,75
АК8	480	72 000	2,80
АК4-1	430	72 000	2,80
АК4-2	400	72 000	2,8
Д20	350...400	72 000	2,84
В1213	450...500	72 000	—

1.2. Магниевые сплавы

Магниевые сплавы подразделяются на деформируемые и литейные. К деформируемым магниевым сплавам относятся:

- сплавы средней прочности МА20, МА20СП. Они предназначены для изготовления деталей сложной конфигурации, в том числе и методом сверхпластичной деформации, таких как приборные панели, спинки и подлокотники пассажирских кресел и т. д.;
- высокопрочные сплавы МА14, МА15, МА22. Их применяют для изготовления различных деталей систем управления типа качалок, кронштейнов, рычагов, элементов внутреннего набора и т. д.;
- сплавов пониженной плотности МА18, МА21;
- гранулированные магниевые сплавы МА2-1гр, МА14гр. Эти сплавы рекомендуются для корпусных деталей изделий машиностроения и товаров широкого применения.

Физико-механические свойства деформируемых сплавов приведены в таблице 1.8, а гранулированных – в таблице 1.9 [8...10].

Таблица 1.8

Физико-механические характеристики деформируемых магниевых сплавов

Марка материала	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль упругости E, МПа	Плотность, г/см ³
МА20	170	41 000	1,78
МА20СП	270	41 000	1,78
МА14	275	41 000	1,8
МА15	295	41 000	1,8
МА22	335	41 000	1,8
МА18	167	47 000	1,5
МА21	225	47 000	1,6

Таблица 1.9

Физико-механические характеристики гранулированных магниевых сплавов

Марка материала	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль упругости E, МПа	Плотность, г/см ³
МА2-1гр	304	42 100	1,78
МА14гр	333	42 100	1,78

К литейным магниевым сплавам относятся:

- высокопрочные сплавы ВМЛ20, ВМЛ24, они применяются для изготовления узлов агрегатов самолетов и двигателей (корпусов насосов, картеров, редукторов, дисков авиационных колес, кронштейнов, ферм, рам и др.);
- коррозионно-стойкие сплавы типа ВМЛ18, рекомендуются для изготовления деталей внутреннего набора планера самолетов и вертолетов, приборных рам, деталей кабин пилотов, систем управления, трансмиссий взамен сплава МЛ5;
- жаропрочные литейные магниевые сплавы. Сплавы предназначены для изготовления деталей самолетов, вертолетов, двигателей, приборов, маслобаков, редукторов и других агрегатов, работающих при повышенной (до 300°C) температуре.

Механические свойства литейных магниевых сплавов приведены в таблицах 1.10, 1.11 [8...10].

Таблица 1.10

Физико-механические характеристики литейных магниевых сплавов

Марка материала	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль упругости E, МПа	Плотность, г/см ³
ВМЛ20	300	43 000	1,8
ВМЛ24	330	43 000	1,8
ВМЛ18	245...250	42 000	1,85

Таблица 1.11

Физико-механические характеристики сплавов жаропрочных магниевых сплавов

Марка материала	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль упругости E, МПа	Плотность, г/см ³
МЛ9	230	43 000	1,78
МЛ10	230	42 000	1,78
МЛ19	220	43 000	1,78

1.3. Бериллиевые сплавы

Сочетание высокой теплоемкости, высокой жесткости, малой плотности и высокая размерная стабильность позволяют применять их для изготовления теплозащитных экранов, тормозных дисков и рамок остекления ЛА, работающих в условиях высоких тепловых нагрузок. Кроме того, сплавы бериллия находят применение в приборостроении и атомной энергетике. Физико-механические характеристики бериллиевых сплавов приведены в таблицах 1.12, 1.13.

Таблица 1.12

Физико-механические характеристики сплавов деформируемых бериллиевых сплавов

Марка материала	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль упругости E, МПа	Плотность, г/см ³
АМБ-1-1	420...460	135 000	2,35
АМБ-1	430...500	135 000	2,35
АМБ-2	420...520	115 000	2,40
АМБ-3	550...620	210 000	2,05
АМБ-4	520...590	170 000	2,18
АМБЦ	570...670	—	2,47
АМБЦ*	570...610	—	2,51
АМБЦ**	630...670	—	2,49

* – добавка 2% Cu; ** – добавлено 0,1...0,7% Zr и 0,4...0,6% Mn.

Таблица 1.13

Физико-механические характеристики литейных бериллиевых сплавов

Марка материала	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль упругости E, МПа	Плотность, г/см ³
ЛБС-1	220...250	200 000	2,1
ЛБС-2	250...320	200 000	2,1
ЛБС-3	270...280	200 000	2,1

1.4. Титановые сплавы

Титановые сплавы подразделяются на следующие группы:

- конструкционные с α , β и $\alpha + \beta$ структурами;
- жаропрочные;
- литейные;
- интерметаллидные.

Конструкционные титановые сплавы применяются для изготовления крупногабаритных силовых конструкций планера, таких как шпангоуты, балки, пояса и т. д. Высокопрочные сплавы (ВТ22, ВТ23, ВТ32, ВТ35) находят дополнительное применение для изготовления деталей шасси, в том числе и стоек. Физико-механические характеристики конструкционных титановых сплавов приведены в таблице 1.14 [8...10].

Таблица 1.14

Физико-механические характеристики конструкционных титановых сплавов

Марка материала	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль упругости E , МПа	Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$
ВТ6	900...1000	115 000	4,45
ВТ20	900...1100	118 000	4,5
ВТ22	1250	118 000	4,62
ВТ22М	1100	110 000	4,62
ВТ22И	1150	110 000	4,62
ВТ23	1080	105 000	4,57
ВТ14	880...1080	—	—
ВТ16	1150...1180	103 000	4,68
ВТ18	960	120 000	4,54
ВТ32	1200	—	4,83
ВТ35	1260	112 000	4,88
ВТ37	1200	—	—
ВТ38	970	120 000	—
ВТ43	1200...1300	—	—
ВТ44	710	—	—
ВТ45	1080	—	—
ВТ47	1210	—	—

Жаропрочные титановые сплавы обладают высоким уровнем жаропрочности, трещиностойкости, термической стабильности при температурах до 450...500°C и низкой чувствительностью к концентраторам напряжений и рекомендуются для высокоресурсных двигателей гражданской авиации. Сплавы ВТ25У и ВТ18У имеют интервалы рабочих температур соответственно до 550 и 600°C. Физико-механические характеристики жаропрочных титановых сплавов приведены в таблице 1.15 [8...10].

Таблица 1.15

Физико-механические характеристики жаропрочных титановых сплавов

Марка материала	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль упругости E, МПа	Плотность, г/см ³
ВТ3-1	980...1180	113 000	4,5
ВТ8-1	980...1180	—	4,52
ВТ8М-1	980...1200	—	4,52
ВТ9	1010...1230	120 000	4,4
ВТ25У	1080...1280	120 300	—
ВТ18У	1150	120 000	—
ВТ36	1029	—	—

Интерметаллидные титановые сплавы имеют высокую удельную жаропрочность при рабочих температурах 650...700°C, но невысокую пластичность [8...10]. Применяются в основном для производства деталей двигателей. Физико-механические характеристики интерметаллидных титановых сплавов приведены в таблице 1.16 [8...10].

Таблица 1.16

Физико-механические характеристики интерметаллидных титановых сплавов

Марка материала	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль упругости E, МПа	Плотность, г/см ³
ВТИ-1	1050	120 000	4,6
ВТИ-2	1050	120 000	4,78
ВТИ-4	1150	130 000	5,15
ВИТ-1	1250	135 000	5,3

Литейные титановые сплавы широко используются для изготовления высоконагруженных деталей ответственного назначения: литых корпусов двигателей, турбин, крыльчаток и т. д. Физико-механические характеристики литейных титановых сплавов приведены в таблице 1.17 [8...10].

Таблица 1.17

Физико-механические характеристики литейных титановых сплавов

Марка материала	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль упругости E, МПа	Плотность, г/см ³
ВТ5Л	686	118 000	4,41
ВТ6Л	834	115 000	4,43
ВТ9Л	930...1130	—	—
ВТ20Л	932	108 000	4,47
ВТ40Л	≥ 1050	—	—

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru