

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»  
(Самарский университет)

*В.Н. КЛИМОВ, Д.М. КОЗЛОВ*

## СОВРЕМЕННЫЕ АВИАЦИОННЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ СПЛАВЫ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по специальности 24.05.07 «Самолето- и вертолетостроение» и направлению подготовки 24.03.04 «Авиастроение»

САМАРА

Издательство Самарского университета

2017

УДК 629.7:620.22(075)

ББК 30.3я7

К 492

Рецензенты: канд. техн. наук, доц. Е. А. Н о с о в а,  
директор Самарского филиала ПАО «Туполев» –  
конструкторское бюро А. А. М а р к о в

***Климов, Виктор Николаевич***

К 492 **Современные авиационные конструкционные сплавы:** учеб. пособие /  
*В.Н. Климов, Д.М. Козлов.* – Самара: Изд-во Самарского университета,  
2017. – 40 с.

**ISBN 978-5-7883-1135-7**

Учебное пособие содержит сведения о свойствах и областях применения всех основных групп конструкционных сплавов. К достоинствам учебного пособия следует отнести его компактность и вместе с тем полноту приводимых сведений о свойствах материалов, видах термообработки, технологических особенностях, примерах применения в современных самолетах. Пособие соответствует требованиям, предъявляемым к изданиям такого типа, и, безусловно, полезно студентам, обучающимся по основным образовательным программам высшего образования по специальности 24.05.07 «Самолето- и вертолестроение» и направлению подготовки 24.03.04 «Авиастроение».

Разработано на кафедре конструкции и проектирования летательных аппаратов.

УДК 629.7:620.22(075)

ББК 30.3я7

ISBN 978-5-7883-1135-7

© Самарский университет, 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 ДЕФОРМИРУЕМЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ .....	8
1.1 Высокопрочные сплавы .....	8
1.2 Высокоресурсные сплавы [3] .....	10
1.3 Сплавы пониженной плотности (сплавы из алюминия и литья) [4]. .....	11
1.4 Жаропрочные и криогенные алюминиевые сплавы [6] .....	13
1.5 Свариваемые, устойчивые к коррозии, высокотехнологичные алюминиевые сплавы [7] .....	14
1.6 Слоистые алюмокомпозиты (СИАЛы) [8, 9] .....	16
2 ЛИТЕЙНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ.....	18
3 ДЕФОРМИРУЕМЫЕ МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ.....	20
3.1 Сплавы средней прочности [13].....	20
3.2 Высокопрочные сплавы [14] .....	20
3.3 Сплавы пониженной плотности [15] .....	21
4 ЛИТЕЙНЫЕ МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ .....	23
4.1 Высокопрочные сплавы [16] .....	23
4.2 Коррозионностойкие сплавы [17] .....	23
4.3 Жаропрочные сплавы [18] .....	24
5 ТИТАН И ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ [19].....	25
5.1 Конструкционные сплавы (нормальной прочности) [20] ....	26
5.2 Высокопрочные конструкционные сплавы [21] .....	27
5.3 Литейные титановые сплавы [22] .....	29
5.4 Термическая обработка титановых сплавов [23].....	30
6 ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СТАЛИ И СТАЛЬНЫЕ СПЛАВЫ.....	32
6.1 Конструкционные стали [23].....	32
6.2 Коррозионностойкие стали [24].....	32
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	34
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	36
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	38
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	39

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Наименование свойства	Обозначение	Единица измерения
Модуль нормальной упругости, определенный статическим методом при растяжении	$E$	ГПа
Предел прочности при растяжении	$\sigma_b$	МПа
Предел текучести условный (с допуском на остаточную деформацию 0,2 %)	$\sigma_{0,2}$	МПа
Относительное удлинение после разрыва	$\delta$	%
Плотность	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>
Вязкость разрушения (или критический коэффициент интенсивности напряжений) при плоской деформации	$K_{Ic}$	МПа $\sqrt{м}$
Условный критический коэффициент интенсивности для образца данной толщины или диаметра	$K_c$	МПа $\sqrt{м}$
Вязкость разрушения (или критический коэффициент интенсивности напряжений) при плоском напряженном состоянии	$K_c^y$	МПа $\sqrt{м}$

## ВВЕДЕНИЕ

От качества материалов, применяемых в отечественной авиационной технике, в большой мере зависит ее конкурентоспособность.

Основным конструкционным материалом для планеров самолётов остаются алюминиевые сплавы. С целью улучшения характеристик давно и успешно применяемых в авиации алюминиевых сплавов (таких как Д16, АК6, АМГ6, АЛ9, В95 и др.) в нашей стране постоянно ведётся научно-исследовательская работа по созданию новых алюминиевых сплавов. Во вновь созданных и внедрённых в отечественное авиационное конструкционных алюминиевых сплавах сделан упор на улучшение следующих их важнейших свойств.

1. Удельной прочности (отношению предела прочности материала к его плотности), которая определяет массу авиационной конструкции по условию статической прочности (способности конструкции воспринимать без разрушения однократно приложенные максимальные (расчётные) внешние нагрузки), а также по условию отсутствия недопустимых остаточных деформаций под действием эксплуатационных нагрузок.

2. Усталостной прочности, или выносливости (способности материала сопротивляться разрушению под действием многократно повторяющейся переменной нагрузки).

3. Технологичности (обрабатываемости материалов высокопроизводительными процессами).

4. Ремонтопригодности (возможности быстро восстанавливать повреждённые части конструкции).

Задача повышения характеристик сплавов, применяемых в агрегатах планера самолётов и вертолётов, решается за счёт значительного улучшения химического состава сплавов – уменьшения содержания примесей кремния и железа, – разработки новых режимов термообработки, улучшения качества полуфабрикатов.

Ещё один способ улучшения свойств алюминиевых сплавов – уменьшение их плотности, которое достигается путём создания ре-

цептур сплавов, легированных литием. Создана серия алюминий – литиевых сплавов:

- средней прочности (1420, 1424, 1441);
- высокой прочности (например, 1460 и др.).

Плотность этих сплавов составляет  $\rho = 2450\text{--}2650 \text{ кг/м}^3$ . Высокопрочный свариваемый сплав 1460 предназначен для эксплуатации в широком интервале температур: от  $+175^\circ\text{C}$  до  $-253^\circ\text{C}$ .

Значительные успехи достигнуты в последнее время в направлениях улучшения свойств других типов авиационных конструкционных материалов: титановых и магниевых сплавов, высокопрочных сталей и сплавов на основе железа и углерода со специальными свойствами, а также композиционных материалов.

В практике работы конструктора основным источником сведений о свойствах конструкционных материалов служит известный справочник по авиационным конструкционным материалам [1]. Следует иметь в виду, что в конструкции самолета, особенно предназначенного для серийного производства и применения в гражданской сфере, должны применяться только сертифицированные материалы. Сертификация подразумевает всестороннюю тщательную проверку свойств материалов. Проверке и подтверждению подлежат свойства материалов как в состоянии поставки (полуфабрикатов), так и после их обработки с целью получения готовых деталей, сборочных единиц и самолета в целом, т.е. свойства материалов в составе конструкции.

Процесс создания и сертификации новых конструкционных материалов сложный и длительный, создание и переиздание справочников по конструкционным материалам также требует больших затрат труда и времени. Поэтому в конструкторских бюро и в проектно-конструкторских подразделениях предприятий используется значительное число дополнительных источников сведений о новых конструкционных материалах в форме отраслевых нормативно-технических документов: технических условий (ТУ), руководящих технических материалов (РТМ), перечней разрешенных к использованных в авиационной технике или в конструкциях отдельных

летательных аппаратов материалов и полуфабрикатов и др. В учебном пособии приведены перечень и основные свойства преимущественно новых металлических авиационных конструкционных материалов, рекомендуемых Всероссийским институтом авиационных материалов (ВИАМ) для применения в конструкциях современных самолетов отечественного производства. Сведения о большинстве из рассмотренных в учебном пособии материалов отсутствуют в справочнике [1].

Можно заметить, что для многих сплавов их механические характеристики приведены с большим диапазоном значений. Это объясняется отличиями свойств, получаемых в различных видах полуфабрикатов и отсутствием более подробных сведений в имеющихся источниках. В учебном проектировании при выборе конкретных значений характеристик для каждого вида полуфабрикатов можно воспользоваться сведениями о соотношениях подобных свойств полуфабрикатов для традиционных сплавов, близких по составу и области применения к выбранному сплаву. Такие данные можно найти в справочнике [1]. Другая особенность приводимых в учебном пособии сведений состоит в том, что по той же причине отдельные характеристики приведены не для всех материалов. В большинстве случаев это относится к характеристикам вязкости разрушения (коэффициенты интенсивности напряжений ( $K_c$ ) и ( $K_{Ic}$ ) при плоском напряжённом состоянии и при плоской деформации соответственно), реже – к значениям относительного удлинения при разрыве ( $\delta\%$ ) и модуля упругости ( $E$ ).

В приложениях А, Б приведены дополнительно сведения о видах и условных обозначениях термической обработки, способах литья, а также маркировке сплава, указывающие состояние полуфабриката при его поставке. В приложении В приведены сведения о применении конструкционных материалов в основных элементах конструкции планера современного ближнемагистрального пассажирского самолета SSI-100 (Сухой-Суперджет-100).

# 1 ДЕФОРМИРУЕМЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

## 1.1 Высокопрочные сплавы

Преимущества по сравнению с ранее применяемыми (традиционными) сплавами [2]:

— повышенная на 15–25 % удельная прочность при статическом нагружении;

— повышенная усталостная прочность.

**1965-1** – особо прочный ( $\sigma_b = 615\text{--}645\text{МПа}$ ;  $\sigma_{0,2} = 595\text{--}620\text{ МПа}$ ;  $\delta = 7\div 8\%$ ) сплав.

Рекомендуется для применения в сжатых зонах конструкций планера самолётов: для верхних обшивок крыла, стоек и других элементов.

Поставляется промышленностью в виде длинномерных катаных плит или листов, прессованных полуфабрикатов: профилей, панелей, полос.

Из данного сплава освоено литьё крупногабаритных круглых прутков и плоских листов; сплав обладает хорошей технологической пластичностью при изготовлении полуфабрикатов в металлургическом производстве.

**В95** п.ч./о.ч. ( $\sigma_b = 500\text{--}560\text{ МПа}$ ;  $\sigma_{0,2} = 430\text{--}480\text{ МПа}$ ;  $\delta = 7\text{--}8\%$ ) – широко применяемый (вместо традиционного **В95**) высокопрочный сплав в виде катаных и прессованных длинномерных (до 30 м) полуфабрикатов для верхних обшивок крыла (плиты, листы), стрингеров, балок, стоек (профили, трубы) и других элементов фюзеляжа и крыла современных самолётов (Ту-204, Бе-200, Ил-96, SSI-100).

**1933-Т2/Т3** – основной высокопрочный ковочный сплав для внутреннего силового набора (фитингов, шпангоутов, кронштейнов и др.), обладает высоким уровнем прочностных свойств ( $\sigma_b = 450\text{--}520\text{ МПа}$ ;  $\sigma_{0,2} = 380\text{--}460\text{ МПа}$ ;  $\delta = 7\text{--}8\%$ ), характеристик ресурса (вязкости разрушения:  $K_{1c} \geq 37\text{--}44\text{ Мпа } \sqrt{м}$ ; сопротивления усталости), коррозионной устойчивости. Благодаря высокой технологичности сплава 1933 в серийном производстве из него изготавливают кованые



и прессованные полуфабрикаты в широком диапазоне размеров (массой до 2000 кг и толщиной до 400 мм). Преимущества сплава 1933 в состояниях, достигаемых новыми улучшенными видами термообработки (1933-T2), перед серийными отечественными сплавами составляют: по прочностным характеристикам – 6–12 %, по вязкости разрушения – 15–50 %, по малоцикловой усталости – 35–80 %. Сплав 1933 превосходит по этим показателям сплавы США (7175 и 7050). Сплав **1933** в состояниях T2 и T3 широко применяется в современных самолётах, таких как Ан-148, Ту-204, SSI-100, Т-50).

**В-1963** – новый ковочный высокопрочный сплав, предназначен для изготовления сильно нагруженных деталей внутреннего набора агрегатов планера самолёта (шпангоутов, фитингов, кронштейнов, балок и др.). Благодаря дополнительному легированию серебром и скандием обладает высокими прочностными характеристиками ( $\sigma_b = 500\text{--}560$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 480\text{--}520$  МПа;  $\delta = 8$  %), вязкостью разрушения ( $K_{Ic} \geq 33\text{--}34$  Мпа  $\sqrt{м}$ ) и сопротивлением усталости. Сплав обладает также улучшенными характеристиками свариваемости по сравнению с аналогичными сплавами без серебра ( $\sigma_{в.св.} = 0,7\sigma_b$ ).

Сводка механических свойств сплавов приведена в табл. 1.

Таблица 1. Механические свойства высокопрочных сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$E$ ГПа	$\delta$ %	$K_{Ic}$ МПа $\sqrt{м}$	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>
		МПа					
1965-1	Листы Профили Плиты	615–645	595–620	72	7–8	24	$2,78 \times 10^3$
В95 пч /оч	Листы Профили Плиты	500–560	430–480	72	7–8	32	$2,78 \times 10^3$
1933- T2/T3	Поковки Штамповки	450–520	380–460	72	7–8	37-43	$2,78 \times 10^3$
В1963	Поковки Штамповки	500–560	480–520	72	8	34	$2,78 \times 10^3$

## 1.2 Высокоресурсные сплавы [3]

**1163АТ (1163АТВ, 1163РДТВ)** – современный высокоресурсный сплав типа дюралюминий ( $\sigma_b = 420\text{--}460$  МПа;  $\delta = 11\text{--}15$  %) с повышенными характеристиками пластичности, вязкости разрушения и усталостной долговечности, позволяющими повысить ресурс и надежность самолета. Сплав является основным для изготовления обшивок фюзеляжа и нижних обшивок крыла, обшивок оперения, элементов внутреннего набора планера.

Выпускается вся номенклатура промышленных полуфабрикатов (листы, плиты, пресованные профили и панели), в том числе длинномерные (до 30 м).

Применение в сплаве **1163РДТВ** твердой регламентированной плакировки из сплава **АД35** [1] толщиной 1,5–2,5 % вместо 2–6 % в листах базового сплава **1163АТ** с плакировкой из мягкого алюминиевого сплава **АДО** [1] в сочетании с повышенной в 1,5 раза чистотой по примесям железа и кремния позволило улучшить характеристики выносливости, вязкости разрушения и пластичности, коррозионной стойкости обшивочных листов из сплава **1163РДТВ**. Сплав **1163АТ** не уступает по свойствам американскому сплаву **2524**.

Сводку свойств сплава в сравнении с традиционным сплавом **Д16чАТ** в табл. 2.

Таблица 2. Механические свойства высокоресурсных сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$E$ ГПа	$\delta$ %	$K_{Ic}$ МПа $\sqrt{м}$	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>
		МПа					
Д16чАТ	Листы	400–	270–	70	10–	118–	$2,78 \times 10^3$
	Профили	490	360				
	Плиты						
1163АТ	Листы	420–	340–	72	11	130–	$2,78 \times 10^3$
	Профили	460	380				
	Плиты						

### 1.3 Сплавы пониженной плотности (сплавы из алюминия и лития) [4]

**1420** – среднепрочный, устойчивый к коррозии, с высоким модулем упругости, свариваемый сплав пониженной плотности ( $\rho = 2470 \text{ кг/м}^3$ ;  $E = 78 \text{ ГПа}$ ;  $\sigma_{\text{в}} = 420\text{--}450 \text{ МПа}$ ;  $\sigma_{0,2} = 270\text{--}300 \text{ МПа}$ ; 9–10 %).

Сплав предназначен для использования в конструкции самолётов (сварные герметичные отсеки, окантовки иллюминаторов, компоненты кабины).

Сплав эффективно используется для изготовления штамповок вместо сплава **АК-6** в связи с пониженной (на 10 %) плотностью, повышенными характеристиками усталости и коррозионной стойкости, а также высоким модулем упругости. Сплав широко применялся в клепаных фюзеляжах палубных штурмовиков вертикального взлета ЯК-36 и ЯК-38; в виде штамповок в пассажирском самолете ЯК-42; в сварных топливных баках и сварной кабине пилота истребителя МиГ-29М; в конструкциях самолётов Су-27 и Ту-204, вертолётa Ми-26Т [5].

**1424** – среднепрочный, устойчивый к коррозии свариваемый сплав пониженной плотности с высоким модулем упругости ( $\rho = 2540 \text{ кг/м}^3$ ;  $E = 80 \text{ ГПа}$ ;  $\sigma_{\text{в}} = 430\text{--}460 \text{ МПа}$ ;  $\sigma_{0,2} = 290\text{--}350 \text{ МПа}$ ) и характеристиками вязкости разрушения, устойчив к трещинам.

Освоено серийное производство листов, прессованных профилей, разработаны технологии сварки ( $\sigma_{\text{в.св.}} = 0,8\sigma_{\text{в}}$ ) и изготовления деталей сложной конфигурации в режиме сверхпластичности (способности сплава очень сильно деформироваться при растяжении при повышенной температуре и контролируемой скорости деформации). Рекомендуется для клепаных и сварных конструкций самолётов (обшивка и внутренний набор фюзеляжа, сварные элементы конструкций), обеспечивает снижение массы на 10-20% по сравнению со сплавами **1163**, **1933** за счет высокой удельной прочности.

**1441** – высокотехнологичный, среднепрочный с высоким модулем упругости сплав ( $\sigma_{\text{в}} = 410\text{--}430 \text{ МПа}$ ;  $E = 80 \text{ ГПа}$ ;  $\rho = 2540 \text{ кг/м}^3$ ) позволяет получать из него плакированные и не плакированные листы

толщиной до 0,3 мм. Установлено, что скорость роста трещин усталости в листах сплава **1441-Т1** в коррозионной среде (3,5 %-ный раствор NaCl) при низких частотах нагружения ( $f = 0,01$  Гц) сохраняет низкие значения, сопоставимые со скоростью роста усталостных трещин в листах сплава **Д16чТ**. Освоено промышленное производство листов с различной регламентированной плакировкой, прессованных профилей и плит. Рекомендуется для силовых элементов планера (обшивок фюзеляжа, стрингерного набора), работающих в любых климатических условиях (до 130°C). Листы из сплава **1441** длительно и успешно применяются в конструкциях обшивки гидросамолетов Бе-103 и Бе-200 ОАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева».

**В-1461-Т1** – высокопрочный, устойчивый к коррозии, свариваемый сплав пониженной плотности, с повышенным модулем упругости ( $\rho = 2630$  кг/м<sup>3</sup>;  $E = 79,5$  ГПа;  $\sigma_B = 40\text{--}560$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 490\text{--}510$  МПа).

Освоено производство листов, плит и прессованных полуфабрикатов.

Рекомендуется для клёпаных и сварных конструкций авиакосмической техники (обшивка и силовой набор планера, элементы конструкций), обеспечивает снижение массы на 8–15 % и работоспособность конструкций в широком интервале температур.

**В-1469-Т1** – высокопрочный, устойчивый к коррозии свариваемый сплав пониженной плотности ( $\rho = 2670$  кг/м<sup>3</sup>;  $E = 78\text{--}80$  ГПа;  $\sigma_B = 580\text{--}600$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 540\text{--}560$  МПа;  $\delta = 8$  %;  $\sigma_{B,св.}/\sigma_B \geq 0,6$ ).

Сплав технологичен при литье и обработке давлением, что позволяет получать из него все виды полуфабрикатов, в том числе листы холодной рулонной прокатки, которые свариваются всеми видами сварки.

Освоено промышленное производство листов толщиной 1,2–6,0 мм и прессованных профилей.

Рекомендуется для элементов, работающих на сжатие длительно в любых климатических условиях (до 150°C) – верхние поверхности крыла, лонжероны, балки, стрингеры.

Сплавы **В-1461**, **В-1469** могут применяться взамен сплава **В95пч** для силового набора планера самолетов. Рациональное использование их в авиационной технике может обеспечить снижение массы деталей и узлов на 10 % в клéпаной и на 20 % в сварной конструкции.

Сводка механических свойств сплавов этой группы дана в табл. 3.

Таблица 3. Механические свойства сплавов пониженной плотности

Сплав	Вид полуфабриката	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$E$ ГПа	$\delta$ %	$K_{1c}$ МПа $\sqrt{м}$	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>
		МПа					
1420	Штамповки	420–450	270–300	78	9–10	38	$2,47 \times 10^3$
1424	Листы Плиты Профили	430–460	290–350	80	6	–	$2,54 \times 10^3$
1441	Листы Плиты Профили	410–430	305–355	80	5	31	$2,54 \times 10^3$
В-1461-Т1	Листы Плиты Профили	540–560	490–510	79,5	–	–	$2,63 \times 10^3$
В-1469-Т1	Листы Плиты Профили	580–600	540–560	78–80	8	35	$2,67 \times 10^3$

#### 1.4 Жаропрочные и криогенные алюминиевые сплавы [6]

**АК4-1ч.** – основной жаропрочный сплав средней прочности ( $\sigma_b = 420$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 270$  МПа) для греющихся авиационных конструкций, в том числе для деталей двигателей. Широко используется в виде плит, листов, штамповок в конструкциях планера современных летательных аппаратов. Из этого сплава изготавливались монолитные фрезерованные панели крыла сверхзвукового пассажирского самолета Ту-144.

**АК4-2ч.** – сплав с повышенной на 10–15 % устойчивостью к распространению трещин, по сравнению со сплавом **АК4-1ч.**, при близкой прочности.

**Д20** – разработан для деталей турбореактивных двигателей, работающих при температурах до 300–350°C, сварных деталей и ёмкостей, работающих кратковременно при температурах в диапазоне от + 250°C до + 300°C ( $\sigma_B = 380$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 280$  МПа).

**В-1213** – перспективный сплав, легированный серебром, обладающий повышенными прочностью ( $\sigma_B = 450\text{--}500$  МПа), жаропрочностью, вязкостью разрушения ( $K_{Ic} \sim 35$  МПа $\sqrt{м}$ ) и сопротивлением усталости. Катаные полуфабрикаты из этого сплава перспективны для создания биметаллических материалов с повышенной температурой эксплуатации.

Механические свойства группы сплавов приведены в табл. 4.

Таблица 4. Механические свойства жаропрочных сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	E ГПа	$\delta$ %	$K_{Ic}$ МПа $\sqrt{м}$	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>
		МПа					
АК4-1ч-Т1	Листы	380–	270–	72	6	–	$2,8 \times 10^3$
	Плиты	420	310				
	Штамповки						
Д20	Листы	350–	240–	72	10	–	$2,84 \times 10^3$
	Профили	400	280				
	Прутки						
В-1213 (перспективный)	Штамповки	450– 500	340	–	–	35	–

### 1.5 Свариваемые, устойчивые к коррозии, высокотехнологичные алюминиевые сплавы [7]

**АМг2, АМг3, АМг6** – термически не упрочняемые сплавы для внутреннего набора самолётов, сварных ёмкостей и топливных баков, прочность сварных соединений составляет 0,9–0,95 прочности основного материала.

**1577** – сплав, легированный скандием, имеет прочность в отожжённом состоянии, близкую к прочности закалённого и естественно состаренного сплава **Д16ч-Т** и позволяет изготавливать сложные по конфигурации детали в режиме сверхпластичности.

**1370Т1** – высокотехнологичный, устойчивый к коррозии, термически упрочняемый сплав с повышенными характеристиками жаропрочности ( $\sigma_b = 400\text{--}500$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 350\text{--}370$  МПа;  $\sigma_b^{150^\circ\text{C}} = 290$  МПа;  $\delta \geq 8\%$ ) и технологичности при холодной деформации.

Сплав используется в виде листов толщиной 0,5–1,2 мм на самолёте Ан-148 (обшивка и гофры носовой части стабилизатора, гофры предкрылков и отклоняемого носка крыла). Освоено производство листов, пресованных профилей и плит, разработана технология сварки. Рекомендуется для обшивки и внутреннего набора фюзеляжа.

**1913 (В91п.ч.) -Т3** – устойчивый к коррозии, свариваемый, термически упрочняемый сплав с высокой прочностью сварных соединений ( $\sigma_b = 450$  МПа,  $\sigma_{b.cв.} = 0,9\sigma_b$ ).

Освоено производство листов, пресованных профилей и штамповок, разработана технология сварки. Рекомендуется для применения в авиационной технике, в том числе для гидросамолётов и экранопланов (обшивки и внутренний набор фюзеляжа).

**В-1341-Т(Т1)** – высокотехнологичный, устойчивый к коррозии, свариваемый сплав средней прочности (свойства в состоянии Т1:  $\sigma_b = 330$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 260$  МПа;  $\delta \geq 10\%$ ).

Разработана промышленная технология получения листов толщиной 0,6-3,0 мм с размером зерна менее 50 мкм, что обеспечивает их высокую технологичность при холодном формообразовании (минимальный радиус **гиба** 0,5–1 толщины листа). Рекомендуется использование в изделиях авиационной техники в виде обшивок, деталей внутреннего набора, перегородок, крепёжных узлов, трубопроводов, сварных баллонов различного назначения, работающих в диапазоне температур от  $-70^\circ\text{C}$  до  $+150^\circ\text{C}$ . Применение тонких листов (до 1,5 мм) в сварных баллонах, работающих под внутренним

давлением, вместо листов сплава АМг-4 (до 3 мм), обеспечивает герметичность по основному металлу и снижение массы изделий на 35–40 %. Освоено промышленное производство всех видов полуфабрикатов.

Сплав применён в новом региональном самолёте SSI-100 (детали внутреннего набора, перегородки, крепежные узлы, трубопроводы системы жизнеобеспечения).

Механические свойства группы сплавов приведены в табл. 5.

Таблица 5. Механические свойства свариваемых сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$E$ ГПа	$\delta$ %	$K_{1c}$ МПа $\sqrt{м}$	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>
		МПа					
АМГ2	Все виды	200	100	71	23		$2,68 \times 10^3$
АМГ3	Все виды	230	120	71	25		$2,68 \times 10^3$
АМГ6	Все виды	340– 400	270– 300	71	30		$2,64 \times 10^3$
1370Т1	Листы Профили Штамповки	400– 500	350– 370		8		
1913Т3	Листы Профили Штамповки	450	350				
В-1341-Т (Т1)	Все виды	330	260				

## 1.6 Слоистые алюмокомпозиты (СИАЛы) [8, 9]

Слоистые алюмокомпозиты (СИАЛы) – новый класс конструкционных материалов, состоящих из тонких (0,3–0,5 мм) алюминиевых листов и прослоек клеевого препрега со стекловолокнами различной структуры армирования в зависимости от назначения деталей.

По сравнению с монолитными алюминиевыми листами главное преимущество СИАЛа – в чрезвычайно высоком сопротивлении разви-



тию усталостных трещин (более чем в 10 раз), которые «ввязнут» в клеевых прослойках стеклопластика. Это преимущество сохраняется и в клепаных конструкциях, широко применяемых в самолетостроении.

В табл. 6 приведены сравнительные свойства материалов класса СИАЛ и листов из алюминиевых сплавов.

Кроме того, СИАЛы на базе листов из сплава 1141Т11 отличаются повышенной жаростойкостью (1000°С, 15 мин – без прогорания), ударостойкостью и достаточной коррозионной стойкостью.

Материалы GLARE (Glass Laminate Aluminium Reinforced – аналоги СИАЛа) эффективно использованы компанией Airbus при изготовлении верхней обшивки фюзеляжа пассажирского самолета А-380 [9].

СИАЛ на базе листов из сплава 1441 использован для элементов молниезащитной обшивки крыла самолета Бе-103 и рекомендован ВИАМ к применению при изготовлении обшивок, внутренних противопожарных перегородок, ограничителей распространения трещин («стопперов» от англ. *stop* – задержка, остановка) в том числе для ремонта авиационной техники, с целью повышения ресурса, живучести и весовой эффективности перспективных конструкций российской авиационной техники.

Таблица 6. Сравнительные свойства материалов типа СИАЛ и листов из алюминиевых сплавов 1441РДТ и 1163АТ

Материал	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$E$	$K_c^y$	$\rho$
	МПа		ГПа	МПа $\sqrt{м}$	кг/м <sup>3</sup>
СИАЛ-3-1 (на базе 1441)	600	280	65	80	$2,36 \times 10^3$
СИАЛ-3 (на базе 1163)	600	250	55	66	$2,47 \times 10^3$
1441РДТ11	450	340	80	99	$2,60 \times 10^3$
1163АТ	430	350	72	66	$2,78 \times 10^3$

## 2 ЛИТЕЙНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Литейные алюминиевые сплавы предназначены для изготовления деталей, обладающих низкой плотностью ( $\rho = 2500\text{--}2600 \text{ кг/м}^3$ ) и высокой удельной прочностью, что позволяет в ряде случаев применять отливки взамен поковок и штамповок. При этом повышается коэффициент использования металла (КИМ) и снижается трудоёмкость изготовления деталей [10, 11, 12].

Данный вид сплавов нашел значительно более широкое применение в конструкциях авиационной и космической техники, чем магниевые. В настоящее время используются алюминиевые сплавы более 15 марок. Среди них наиболее распространенными являются ВАЛ12, ВАЛ14, ВАЛ16. Наиболее высокопрочный из них литейный алюминиевый сплав ВАЛ12 (Al-Zn-Mg-Cu) может успешно конкурировать не только с деформируемыми алюминиевыми сплавами, но и с малоуглеродистыми сталями, бронзами, латунями. Сплав обладает удовлетворительными литейными свойствами и коррозионной стойкостью (общей и под напряжением), предназначается для производства деталей, к которым предъявляются повышенные требования по характеристикам надежности, а также прочности, текучести, усталости.

**АЛ4МС** – высокопрочный высокотехнологичный сплав (системы Al-Si-Cu-Mg – медистый силумин со скандием) обеспечивает при литье в кокиль высокие характеристики ( $\sigma_b = 360\text{--}400 \text{ МПа}$ ;  $\delta \geq 4 \%$ ), не склонен к образованию трещин, рабочая температура  $250^\circ\text{C}$ , можно отливать детали любыми способами, в том числе прогрессивным способом литья по газифицируемым и выжигаемым моделям.

**ВАЛ12** – высокопрочный сплав (системы Al-Zn-Mg-Cu), литьё в кокиль и жидкая штамповка, рабочая температура  $250^\circ\text{C}$  (длительно) и  $300^\circ\text{C}$  (кратковременно), ( $\sigma_b \geq 550 \text{ МПа}$ ,  $\delta \geq 3 \%$ ).

**ВАЛ14** и **ВАЛ18** – жаропрочные сплавы (системы Al-Cu-Mn), литьё в песчаные формы, для высоконагруженных деталей, работающих при температурах  $300\text{--}350^\circ\text{C}$  ( $\sigma_b = 380\text{--}500 \text{ МПа}$ ;  $\delta = 7,5\text{--}10 \%$ ).

**ВАЛ16** – устойчивый к коррозии литейный алюминиевый сплав (системы Al-Mg), в том числе свариваемый ( $\sigma_{в.св.} = 240$  МПа), эксплуатирующийся при температурах от  $-70^{\circ}\text{C}$  до  $+140^{\circ}\text{C}$  (длительно) и до  $150^{\circ}\text{C}$  (кратковременно).

**ВАЛ20** – высокопрочный сплав (системы Al-Cu-Mg), предназначенный для литья в песчаные формы фасонных отливок сложной конфигурации деталей внутреннего набора (корпуса, качалки, кронштейны). Рабочая температура  $+200^{\circ}\text{C}$  (длительно),  $+250^{\circ}\text{C}$  (кратковременно), ( $\sigma_{в} = 420$  МПа;  $\delta = 7\%$ ).

В табл. 7 представлены механические свойства группы литейных алюминиевых сплавов.

Таблица 7. Механические свойства литейных алюминиевых сплавов

Сплав	Способ литья	$\sigma_{в}$	$\sigma_{0,2}$	$E$ ГПа	$\delta$ %	$K_{Ic}$ МПа $\sqrt{м}$	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>
		МПа					
АЛ4МС	Все виды литья	360–400	280	70	$\geq 4$		$2,72 \times 10^3$
ВАЛ12	Кокиль Жидкая штамповка	540	400	70	$\geq 3$		$2,8 \times 10^3$
ВАЛ14	Песчаные формы	380–500	450	70	7,5–10		$2,8 \times 10^3$
ВАЛ16	Кокиль	255		70	6		$2,8 \times 10^3$
ВАЛ18	Песчаные формы	380		70	7,5		$2,8 \times 10^3$
ВАЛ20	Песчаные формы	420		70	7		$2,8 \times 10^3$

## 3 ДЕФОРМИРУЕМЫЕ МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

### 3.1 Сплавы средней прочности [13]

**МА20** ( $\sigma_b = 170$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 157$  МПа;  $\delta = 18$  %).

**МА20СП** ( $\sigma_b = 270$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 220$  МПа;  $\delta = 14$  %).

Эти сплавы отличаются от других деформируемых магниевых сплавов повышенной пластичностью и технологичностью. Они не склонны к коррозионному растрескиванию, обладают удовлетворительной коррозионной стойкостью. Сплавы хорошо свариваются аргонодуговой электрической сваркой и контактной электросваркой.

Сплав **МА20СП** предназначен также для изготовления деталей сложной конфигурации методом сверхпластичной деформации (детали приборных панелей, декоративные детали, спинки и подлокотники пассажирских кресел).

Механические свойства сплавов приведены в табл. 8.

Таблица 8. Механические свойства магниевых сплавов средней прочности

Сплав	Вид полуфабриката	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$E$ ГПа	$\delta$ %	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>
		МПа				
МА20	Все виды	170	157	41	18	$1,76 \times 10^3$
МА20СП	Все виды	270	220	41	14	$1,76 \times 10^3$

### 3.2 Высокопрочные сплавы [14]

**МА14** ( $\sigma_b = 275$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 175$  МПа;  $\delta = 7$  %).

**МА15** ( $\sigma_b = 295$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 245$  МПа;  $\delta = 5$  %).

**МА22** ( $\sigma_b = 335$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 240$  МПа;  $\delta = 8$  %).

Детали из **МА14** предназначены для длительной эксплуатации, при температуре до 125°C. Сплав нашел широкое применение в конструкциях не только гражданских, но и военных самолетов (Су-27, Су-30, МиГ-29 и др.). Из этого сплава изготавливаются различные де-

тали систем управления (качалки, кронштейны, рычаги и пр.) и детали внутреннего набора из плит, профилей, штамповок и т.д.

Из сплава **МА22** изготавливаются детали, которые могут длительно (до 100 часов) эксплуатироваться при температуре до 200°C. Детали из данного сплава хорошо свариваются аргонодуговой электрической сваркой ( $\sigma_{в.св.}/\sigma_{в} = 0,88$ ).

Механические свойства высокопрочных магниевых сплавов представлены в табл. 9.

Таблица 9. Механические свойства высокопрочных магниевых сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	$\sigma_{в}$	$\sigma_{0,2}$	$E$ ГПа	$\delta$ %	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>
		МПа				
МА14	Поковки	275	175	41	7	$1,8 \times 10^3$
МА15	Штамповки	295	245	41	5	$1,8 \times 10^3$
МА22	Поковки	335	240	41	8	$1,8 \times 10^3$

### 3.3 Сплавы пониженной плотности [15]

Эти сплавы наряду с другими легированными элементами содержат литий в количестве до 10,5 % (по массе). Плотность сплавов понижается с повышением содержания лития и составляет 1500–1600 кг/м<sup>3</sup> (вместо 1780-1820 кг/м<sup>3</sup> для обычных магниевых сплавов).

**МА18** ( $\sigma_{в} = 167$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 127$  МПа;  $\delta = 30$  %).

Данный сплав отличается высокой пластичностью при комнатной и криогенной температурах, повышенным модулем упругости ( $E = 47$  ГПа) и высокой удельной жесткостью. Из сплава могут быть изготовлены все виды полуфабрикатов, свариваемых аргонодуговой электрической сваркой. Сплав обладает удовлетворительной коррозионной стойкостью.

**МА21** ( $\sigma_{в} = 225$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 175$  МПа;  $\delta = 14$  %).

Данный сплав предназначен для эксплуатации в диапазоне температур  $\pm 60^{\circ}\text{C}$ , когда требуется высокая жесткость и повышенная прочность при сжатии.

Механические свойства магниевых сплавов пониженной плотности представлены в табл. 10.

Таблица 10. Механические свойства магниевых сплавов пониженной плотности

Сплав	Вид полуфабриката	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$E$ ГПа	$\delta$ %	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>
		МПа				
МА18	Лист	167	127	47	30	$1,6 \times 10^3$
	Пруток					
МА21	Лист	225	175	47	14	$1,6 \times 10^3$
	Пруток					

## 4 ЛИТЕЙНЫЕ МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

### 4.1 Высокопрочные сплавы [16]

**ВМЛ20-Т6** ( $\sigma_b = 300$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 200$  МПа;  $\delta = 4,5$  %).

Данный сплав имеет повышенную коррозионную стойкость. Рекомендуется к применению вместо сплавов **МЛ15**, **МЛ8**, **МЛ12** для деталей узлов агрегатов самолетов и двигателей (корпуса насосов, картеры, редукторы, вентиляторы).

**ВМЛ24-Т6** ( $\sigma_b = 330$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 245$  МПа;  $\delta = 5$  %).

Данный сплав предназначен для изготовления литых нагруженных деталей самолетов, вертолетов, двигателей (авиационные колеса, кронштейны, фермы, рамы и др.).

Механические свойства высокопрочных сплавов приведены в табл. 11.

Таблица 11. Механические свойства высокопрочных сплавов

Сплав	Способ литья	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$E$ ГПа	$\delta$ %	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>
		МПа				
ВМЛ20-Т6	Кокиль	300	200	43	4,5	$1,8 \times 10^3$
ВМЛ24-Т6	Кокиль	330	245	43	5	$1,8 \times 10^3$

### 4.2 Коррозионностойкие сплавы [17]

**ВМЛ18-Т4** ( $\sigma_b = 245$ – $250$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 100$ – $110$  МПа;  $\delta = 5$ – $8$  %).

Сплав предназначен для работы во всех климатических условиях. Рекомендуется для изготовления деталей внутреннего набора планера самолетов и вертолетов, приборных рам, деталей кабин пилотов, систем управления, трансмиссий взамен сплава **МЛ15** п.ч.

Сплав выплавляется по специальной технологии, разработанной в ВИАМ. Он превосходит по коррозионной стойкости и чистоте все существующие магниевые сплавы.

Механические свойства сплава приведены в табл. 12.

Таблица 12. Механические свойства коррозионностойкого сплава

Сплав	Способ литья	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$E$ ГПа	$\delta$ %	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>
		МПа				
ВМЛ18-Т4	Кокиль	245–250	100– 110	42	5–8	$1,85 \times 10^3$

### 4.3 Жаропрочные сплавы [18]

**МЛ9-Т6** ( $\sigma_b = 230$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 120$  МПа;  $\delta = 4$  %).

**МЛ10-Т6** ( $\sigma_b = 230$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 140$  МПа;  $\delta = 3$  %)

**МЛ19-Т6** ( $\sigma_b = 220$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 120$  МПа;  $\delta = 3$  %).

Сплавы предназначены для изготовления деталей самолетов, вертолетов, двигателей, приборов, маслоагрегатов, редукторов и других агрегатов, работающих при повышенной (до 300°C) температуре.

Наиболее широко применяется сплав **МЛ10**, отличающийся повышенным уровнем механических свойств, см. табл. 13. Для всех сплавов характерны хорошие литейные свойства, которые позволяют изготавливать из них сложные крупногабаритные отливки, мало склонные к образованию микрорыхлот, имеющие повышенную герметичность, устойчивое постоянство размеров выплавляемых деталей.

Таблица 13. Механические свойства жаропрочных сплавов

Сплав	Способ литья	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$E$ ГПа	$\delta$ %	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>
		МПа				
МЛ9-Т6	Кокиль	230	120	43	4	$1,76 \times 10^3$
МЛ10-Т6	Кокиль	230	140	42	3	$1,78 \times 10^3$
МЛ19-Т6	Кокиль	220	120	43	3	$1,78 \times 10^3$



## 5 ТИТАН И ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ [19]

Отличительными особенностями титана являются высокая прочность ( $\sigma_b = 800\text{--}1500$  МПа), хорошая пластичность ( $\delta = 12\text{--}25$  %), небольшая плотность ( $\rho = 4540$  кг/м<sup>3</sup>) и поэтому высокая удельная прочность при температуре 20–25°C и криогенных температурах, хорошая коррозионная стойкость, жаропрочность.

Из титана изготавливают все виды прессованных и катаных полуфабрикатов (листы, трубы, проволоки, поковки и др.). Титан хорошо сваривается аргодуговой электрической сваркой, всеми видами контактной сварки. Сварные швы обладают хорошим сочетанием прочности и пластичности. Прочность сварного шва составляет 90 % прочности основного металла.

Титан обладает высокой коррозионной стойкостью, так как на его поверхности образуется стойкая пленка окиси титана.

Однако титан плохо обрабатывается резанием, «налипает» на инструмент, что приводит к его быстрому износу. Недостатком титана также является его низкая антифрикционность

Достоинством титановых сплавов по сравнению с алюминиевыми и магниевыми сплавами являются более высокая прочность и жаропрочность при достаточно хорошей пластичности, высокой коррозионной стойкости.

По технологии изготовления титановые сплавы подразделяются:

- на деформируемые;
- литейные;
- порошковые.

По механическим свойствам подразделяются:

- на сплавы нормальной прочности (конструкционные);
- высокопрочные;
- жаропрочные;
- повышенной пластичности.

По способности упрочняться с помощью термообработки титановые сплавы делятся на упрочняемые и неупрочняемые.

В области конструкционных, в том числе литейных титановых сплавов, задача повышения ресурса и надежности решается созданием

нового поколения комплексно легированных сплавов (типа ВТ-23) с повышенными характеристиками предела выносливости на 30 % и трещиностойкости на 200 %, при снижении стоимости сплава на 20-30 % за счет полного перехода на отечественное сырье и недефицитные легирующие компоненты (отсутствие молибдена и ванадия).

### 5.1 Конструкционные сплавы (нормальной прочности) [20]

Сплав **ВТ20** ( $\sigma_b = 932$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 834$  МПа) является в настоящее время наиболее широко применяемым титановым сплавом. Его используют как в конструкции планера самолетов, так и для изготовления деталей газотурбинных двигателей. В конструкции планера самолета Су-35 из этого сплава изготовлено значительное количество деталей и сварных узлов фюзеляжа, крыла и киля. Для изготовления деталей и узлов используют полуфабрикаты в виде плит, штамповок, профилей, прутков и листов.

Сплав **ВТ23** ( $\sigma_b = 1080$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 1010$  МПа) – свариваемый сплав широкого применения. Используется в монолитных, сварных и паяных конструкциях самолётов, ракет и космических летательных аппаратов. Разработаны технологии изготовления полуфабрикатов (листов, лент, штамповок, поковок) массой до 3,5 тонны. Сплав применен широко в конструкциях самолетов Ан-158, Су-29, Су-31М и др.

Сплав **ВТ18ч** ( $\sigma_b = 1000-1200$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 950-1150$  МПа) – листовой конструкционный сплав высокотемпературного применения (до 600°C). Предназначен для изготовления обшивок самолетов, ракет и в конструкциях двигателей.

Сплав **ВТ38** ( $\sigma_b = 970$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 530$  МПа при 650°C) – новый жаропрочный, жаростойкий пониженной окисляемости сплав с рабочей температурой до 650°C. Предназначен для изготовления обшивок самолетов, ракет и в конструкциях двигателей.

Сплав **BT43** ( $\sigma_b = 1200\text{--}1300$  МПа) – свариваемый сплав широкого применения. Используется в монолитных, сварных и паяных конструкциях самолетов и ракет. Механические свойства конструкционных сплавов представлены в табл. 14.

Таблица 14. Механические свойства конструкционных сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$E$ ГПа	$\delta$ %	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>
		МПа				
BT20	Листы	930–1200	850–1050	112	8–10	$4,45 \times 10^3$
	Плиты					
	Профили					
	Прутки					
	Штамповки					
BT23	Листы	1080	1010	105	6–9	$4,57 \times 10^3$
	Ленты					
	Штамповки					
	Поковки					
BT23М	Листы	1150	1060	105	–	–
	Ленты					
	Штамповки					
	Поковки					
BT18	Лист	960	950	120	10	$4,54 \times 10^3$
BT38	Лист	970		120	–	–
BT43	Лист	1200–1300	–	–	–	–
	Плита					

## 5.2 Высокопрочные конструкционные сплавы [21]

Высокопрочные титановые сплавы применяются для изготовления деталей и узлов ответственного назначения: сварные конструкции, турбины, штампованные узлы, высоконагруженные детали и конструкции. Эти сплавы могут длительно работать при температуре до 400°C и кратковременно до 750°C.

Особенность высокопрочных титановых сплавов как конструкционного материала – их повышенная чувствительность к

концентраторам напряжения. Поэтому при конструировании деталей из этих сплавов необходимо учитывать ряд требований (повышенное качество поверхности, увеличение радиусов перехода от одних сечений к другим и т.п.), аналогичных тем, которые существуют при применении высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов.

Сплав **BT22** ( $\sigma_b = 1030$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 950$  МПа) – свариваемый титановый сплав с высокой прокаливаемостью. Широко применяется в изделиях авиационной техники (самолёты Ил-76, Ил- 86, Ил- 96, Ан-72, Ан-124, Ан-224, Ан-148, Як-42, Бе-200, Ту-204, МиГ-29, Т-50). Сплав предназначен для изготовления крупногабаритных деталей внутреннего силового набора (балок, лонжеронов, шпангоутов, нервюр, рельсов закрылков и предкрылков), а также для изготовления крупногабаритных силовых деталей и узлов шасси, в том числе сварных (траверс, балок основных шасси, шлиц-шарниров, тормозных рычагов).

Для изготовления деталей и узлов применяются следующие полуфабрикаты: поковки, штамповки, прутки, плиты, прессованные профили.

Сплав **BT22М** ( $\sigma_b = 1100$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 1020$  МПа) – усовершенствованный свариваемый сплав, перспективен для изготовления крупногабаритных деталей внутреннего силового набора и крупногабаритных силовых деталей и узлов шасси.

Сплав **BT22И** ( $\sigma_b = 1150$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 1020$  МПа) – высокотехнологичный сплав для изготовления точных штамповок методом изотермического деформирования в условиях сверхпластичности, обеспечивающей изготовление термостойких деталей сложной конфигурации (панелей, крышек люков, кронштейнов и др.) с однородной мелкозернистой структурой, высоким и устойчивым уровнем механических свойств.

Механические свойства высокопрочных конструкционных сплавов сведены в табл. 15.

Таблица 15. Механические свойства высокопрочных конструкционных сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$E$ ГПа	$\delta$ %	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>
		МПа				
BT22	Плиты Профили Прутки Штамповки	1030	950	110	6	$4,62 \times 10^3$
BT22M	Плиты Профили Прутки Штамповки	1100	1020	110	8	$4,62 \times 10^3$
BT22И	Плиты Профили Прутки Штамповки	1150	1020	110	8	$4,62 \times 10^3$

### 5.3 Литейные титановые сплавы [22]

Литейные титановые сплавы отличаются малой склонностью к образованию горячих трещин, линейной усадкой – 1 %, объемной усадкой – 3 %.

Отливки изготавливаются методом фасонного литья в чугунные, стальные и специальные формы.

Литейные сплавы обладают более низкими механическими свойствами, чем соответствующие деформируемые.

Упрочняемая термообработка не применяется, так как резко снижает пластичность сплавов.

Сплавы **BT1Л** ( $\sigma_b = 343$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 270$  МПа), **BT5Л** ( $\sigma_b = 686$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 618$  МПа), **BT20Л** ( $\sigma_b = 932$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 834$  МПа) широко используются для изготовления высоконагруженных деталей ответственного назначения (литых корпусов, турбин, крыльчаток и т.д.).

Сплав **BT6Л** ( $\sigma_b = 834$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 736$  МПа) рекомендуется для изготовления деталей, работающих до температуры 400°C. Сплав является термоупрочняемым, путем термообработки (закалка и старение) можно поднять прочность до 1100 МПа.

Сплав **BT40Л** ( $\sigma_B = 1030$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 900$  МПа) обладает повышенной прочностью, а также высоким пределом выносливости ( $\sigma_B=340$  МПа на базе  $10^7$  циклов при частоте нагружения 50 Гц) и рекомендуется для применения вместо серийных сплавов **BT6Л** и **BT20Л** в агрегатах планера самолетов и в двигателях для изготовления различных высокоресурных деталей.

Механические свойства литейных титановых сплавов представлены в табл. 16 [21].

Таблица 16. Механические свойства литейных титановых сплавов

Сплав	Способ литья	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$E$ ГПа	$\delta$ %	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>
		МПа				
BT1Л	Выплавляемые модели	343	270	112	10	–
BT5Л	Выплавляемые модели	686	618	118	6	$4,41 \times 10^3$
BT6Л	Выплавляемые модели	834	736	115	5	$4,43 \times 10^3$
BT20Л	Под давлением	932	834	108	5	$4,47 \times 10^3$
BT40Л	Под давлением	1030	900	–	5	–

## 5.4 Термическая обработка титановых сплавов [23]

Для титановых сплавов применяются следующие виды термической обработки: отжиг, закалка и старение; а также химико-термическая обработка (азотирование, силицирование, оксидирование и др.).

Отжиг применяется для всех титановых сплавов с целью снижения твердости, повышения пластичности, измельчения зерна, устранения структурной неоднородности.

Для стабилизации структуры и механических свойств применяется обычный отжиг, двойной или изотермический отжиг.

Для снятия внутренних напряжений применяется неполный отжиг.

Закалка и старение – упрочняемая термообработка, применяемая только к титановым сплавам с ( $\alpha + \beta$ ) структурой: ВТ6, ВТ8, ВТ9, ВТ14, ВТ22.

Из всех видов химико-термической обработки титановых сплавов наибольшее распространение получило азотирование.

Детали из титановых сплавов после азотирования обладают хорошими антифрикционными свойствами, повышенным пределом выносливости, коррозионной стойкостью и высокой износостойкостью.

## 6 ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СТАЛИ И СТАЛЬНЫЕ СПЛАВЫ

### 6.1 Конструкционные стали [23]

Сталь **ВКС-6** ( $\sigma_b = 1550$  МПа) работоспособна в интервале температур от  $-130$  до  $+500^\circ\text{C}$ . Обладает высокой вязкостью разрушения и сопротивляется замедленному хрупкому разрушению в воде.

Стали **ВКС-9** ( $\sigma_b = 1950$  МПа) и **ВКС-12** ( $\sigma_b = 2300$  МПа) обладают высокой степенью надежности, хорошо свариваются электронно-лучевой сваркой с обеспечением прочности сварного соединения, равной 0,9 от прочности основного металла после упрочняемой термообработки. Применяются для изготовления высоконагруженных деталей, в том числе деталей шасси.

Сталь **ВКС-10** ( $\sigma_b = 1300$  МПа) обеспечивает с высокой степенью надежности длительную работоспособность деталей до температуры  $+450^\circ\text{C}$ .

Область применения – зубчатые колеса.

Сталь **ВКС-14** ( $\sigma_b = 1900$  МПа) – износостойкая сталь применяется для изготовления без химико-термической обработки средне- и мелкокомодульных зубчатых колес, пар трения, инструмента.

### 6.2 Коррозионностойкие стали [24]

Сталь **ЭП 817** ( $\sigma_b = 1350$  МПа) предназначена для изготовления силовых узлов, в том числе сварных, длительно работающих при температуре до  $+300^\circ\text{C}$  во всех климатических условиях. Сталь не склонна к коррозии под напряжением.

Сварные швы не склонны к межкристаллитной коррозии и коррозии под напряжением. Сталь хорошо сваривается аргонодуговой сваркой, электроннолучевой сваркой и электроконтактной сваркой. После сварки не требуется последующей термообработки.



Стали **СН-2А** ( $\sigma_b = 1300$  МПа), **ВНС-5** ( $\sigma_b = 1550$  МПа), **ВНС-43** ( $\sigma_b = 1650$  МПа) обладают высокой вязкостью разрушения, трещиностойкостью, хорошей свариваемостью всеми видами сварки с обеспечением высокой прочности после соответствующей термообработки. Применяются для изготовления крепежных элементов и силовых деталей планера самолетов.

Сталь **ВНС-65** ( $\sigma_b = 1760$  МПа ) предназначена для изготовления силовых, в том числе сварных, деталей планера самолетов, работающих в диапазоне температур от  $-70$  до  $+200^\circ\text{C}$  во всех климатических условиях. Сталь не склонна к межкристаллитной коррозии, хорошо сваривается аргонодуговой и электроннолучевой сваркой.

Сталь **ВНС-53** ( $\sigma_b = 980$  МПа) – коррозионностойкая сталь с температурой эксплуатации от  $-70$  до  $+300^\circ\text{C}$ , обеспечивает высокую технологичность при изготовлении деталей трубопроводных систем (гибка, раскатка, развальцовка). Трубы из этого сплава с толщиной стенки от 0,5 мм по характеристикам прочности и выносливости в два раза превосходят трубы, изготовленные из традиционно применяемой стали 12Х18Н9Т.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Авиационные материалы [Текст] : справ. в 9 т. / М-во авиац. пром-сти СССР, Всесоюз. науч.-исслед. ин-т авиац. материалов ; под общ. ред. Р. Е. Шалина. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : ОНТИ, 1973–1982.
2. [http://viam.ru/al\\_wrought\\_1](http://viam.ru/al_wrought_1) (дата обращения 18.03.2015)
3. [http://viam.ru/al\\_wrought\\_2](http://viam.ru/al_wrought_2) (дата обращения 18.03.2015)
4. [http://viam.ru/al\\_wrought\\_4](http://viam.ru/al_wrought_4) (дата обращения 18.03.2015)
5. Фридляндер, И. Н. Воспоминания о создании авиакосмической и атомной техники из алюминиевых сплавов / И. Н. Фридляндер. – М.: Наука, 2005. – 277 с.
6. [http://viam.ru/al\\_wrought\\_5](http://viam.ru/al_wrought_5) (дата обращения 18.03.2015)
7. [http://viam.ru/al\\_wrought\\_3](http://viam.ru/al_wrought_3) (дата обращения 18.03.2015)
8. [http://viam.ru/al\\_wrought\\_6](http://viam.ru/al_wrought_6) (дата обращения 18.03.2015)
9. Высокочечные трещиностойкие легкие слоистые алюмокомпластики класса СИАЛ – перспективный материал для авиационных конструкций / [О.Г. Сенаторова и др.] // Технология легких сплавов легких сплавов. – № 2. – 2009. – С. 28–31.
10. [http://viam.ru/al\\_casting\\_1](http://viam.ru/al_casting_1) (дата обращения 18.03.2015)
11. [http://viam.ru/al\\_casting\\_2](http://viam.ru/al_casting_2) (дата обращения 18.03.2015)
12. [http://viam.ru/al\\_casting\\_3](http://viam.ru/al_casting_3) (дата обращения 18.03.2015)
13. [http://viam.ru/Mg\\_1](http://viam.ru/Mg_1) (дата обращения 18.03.2015)
14. [http://viam.ru/Mg\\_2](http://viam.ru/Mg_2) (дата обращения 18.03.2015)
15. [http://viam.ru/Mg\\_5](http://viam.ru/Mg_5) (дата обращения 18.03.2015)
16. [http://viam.ru/mg\\_casting\\_1](http://viam.ru/mg_casting_1) (дата обращения 18.03.2015)
17. [http://viam.ru/mg\\_casting\\_2](http://viam.ru/mg_casting_2) (дата обращения 18.03.2015)
18. [http://viam.ru/mg\\_casting\\_3](http://viam.ru/mg_casting_3) (дата обращения 18.03.2015)
19. <http://www.1metal.ru/info-tisplav.html> (дата обращения 18.03.2015)
20. [http://viam.ru/ti\\_2](http://viam.ru/ti_2) (дата обращения 18.03.2015)
21. [http://viam.ru/ti\\_3](http://viam.ru/ti_3) (дата обращения 18.03.2015)

22. [http://viam.ru/casting\\_titanium\\_alloys](http://viam.ru/casting_titanium_alloys) (дата обращения 18.03.2015)
23. <http://www.naukaspb.ru/spravochniki/Demo%20Metall/> (дата обращения 18.03.2015)
24. [http://viam.ru/steel\\_1](http://viam.ru/steel_1) (дата обращения 18.03.2015)
25. [http://viam.ru/steel\\_2](http://viam.ru/steel_2) (дата обращения 18.03.2015)

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Виды и условные обозначения термической обработки алюминиевых деформируемых сплавов [1]:

М – мягкий отжиг;

T – закалка и естественное старение;

TR (T1P) – закалка и старение (естественное и искусственное) с рекристаллизованной структурой;

T1C – закалка и искусственное старение особой прочности (для листов);

T1П (T1ПП) – закалка, старение (естественное и искусственное), повышенной прочности (для профилей и прутков с преимущественно нерекристаллизованной структурой);

TН – закалка, естественное старение и нагартовка;

T1Н – закалка, нагартовка и искусственное старение;

T2 – закалка, искусственное старение по режиму, обеспечивающему более высокие значения вязкости разрушения и улучшенное сопротивление коррозии под напряжением;

T3 – закалка, искусственное старение по режиму, обеспечивающему наиболее высокое сопротивление коррозии под напряжением и вязкость разрушения.

Виды и условные обозначение термической обработки алюминиевых литейных сплавов [1]:

T1, T2-1 – искусственное старение без предварительной закалки;

T2 – отжиг;

T4 – закалка;

T5 – закалка и полное искусственное старение;

T6 – закалка и полное искусственное старение;

T7, T8 – закалка и стабилизирующее старение.

Обозначение способов литья:

З – литье в песчаные формы;

В – литье по выплавляемым моделям;

К – литье в кокиль;

Д – литье под давлением;

О – литье в оболочковые формы;

М – сплав при литье подвергается модификации;

ЛГМ – литье по газифицируемым моделям;

ЛВМ – литье по выплавляемым моделям;

ЖШ – жидкая штамповка;

ПЖШ – полужидкая штамповка.

Виды и условные обозначения термической обработки магниевых сплавов [1]:

М – мягкий, отжиг после деформации;

Н – полунагартованный (низкотемпературный отжиг после деформации);

T1 – искусственное старение после деформации или из литого состояния;

T2 – отжиг после литья;

T4 – закалка после деформации или после отжига;

T6 – закалка (на воздухе) и искусственное старение);

T61 – закалка (в воде) и искусственное старение после деформации или литья;

T8 – закалка с последующей нагартовкой и искусственное старение.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Система обозначений, используемых для отечественных алюминиевых сплавов после основной маркировки сплавов, указывающая состояние полуфабриката:

А – нормальная плакировка чистым алюминием;

Б – технологическая плакировка;

В – повышенное качество выкатки (для листов);

Л – литейный сплав;

М – мягкий, отожженный;

Н – нагартованный;

Н1 – усиленно нагартованный;

Н2 – полунагартованный;

ОЧ – особой чистоты по примесям железа и кремния;

ПЧ – повышенной чистоты по примесям железа и кремния;

РД – с твердой плакировкой (для обшивочных листов);

Т8 - виды термообработки (пример, согласно Приложению А);

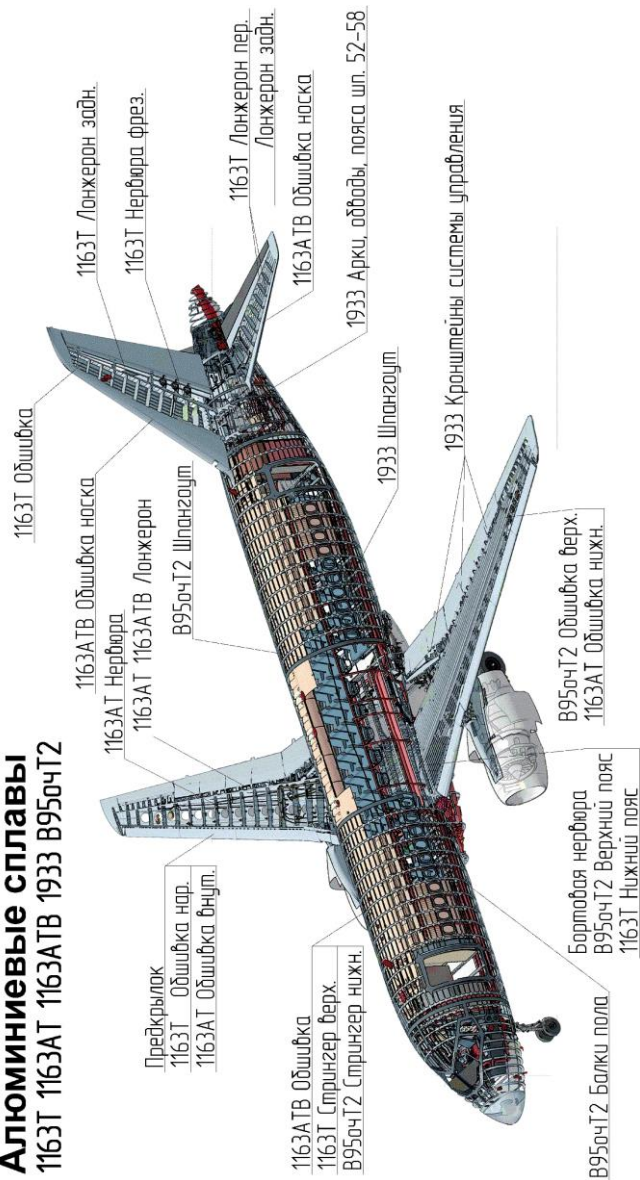
У – усиленная плакировка;

Ч – чистый по примесям железа и кремния.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Применение алюминиевых сплавов в конструкции планера самолёта SSI-100.

### Алюминиевые сплавы 1163Т 1163АТ 1163АТВ 1933 В9504Т2



Учебное издание

*Климов Виктор Николаевич*  
*Козлов Дмитрий Михайлович*

**СОВРЕМЕННЫЕ АВИАЦИОННЫЕ  
КОНСТРУКЦИОННЫЕ СПЛАВЫ**

*Учебное пособие*

Редактор А.В. Ярославцева  
Компьютерная вёрстка А.В. Ярославцева

Подписано в печать 13.03.2017. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 2,5.

Тираж 25 экз. Заказ . Арт. 8/2017.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»  
(Самарский университет)  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во Самарского университета.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.