

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА»**

Р. ЗАББАРОВ

**МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК И ОТЛИВОК
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

САМАРА 2008

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА»

Р. ЗАББАРОВ

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК И ОТЛИВОК
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2008

УДК 621.74:629.7(075.8)

БКК 3461

З 122

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. В. П. С а м о х в а л о в

д-р техн. наук И. П. П о п о в

Заббаров Р.

З 122 **Материалы и технологические процессы изготовления заготовок и отливок аэрокосмического назначения: учеб. пособие / Р. Заббаров.** – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. – 92 с. : ил.

ISBN 978-5-7883-0691-9

Приведены металлургические термины, состав, физические, механические, технологические свойства сталей и сплавов и области их применения, современные способы получения металлов и сплавов, литья заготовок и изделий.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, изучающих курсы “Введение в металлургию”, “История науки и техники” (специальности 150106 Обработка металлов давлением и 150201 Машины и технология обработки металлов давлением), “Материаловедение” (специальности 160201 Самолето- и вертолетостроение, 160301 Авиационные двигатели и энергетические установки, 160901 Технологическая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей, 150106 и 150201), “Технология конструкционных материалов” (специальности 160301, 160901, 150106 и 150201), “Основы производства и обработки металлов” (специальность 150106). Подготовлено на кафедре “Технология металлов и авиаматериаловедение”.

УДК 621.74:629.7(075.8)

БКК 3461

ISBN 978-5-7883-0691-9

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
Принятые сокращения и обозначения.....	6
1. Литейные сплавы.....	8
1.1. Алюминиевые сплавы. Маркировка.....	8
1.2. Магниеые сплавы.....	24
1.3. Титановые сплавы.....	32
1.4. Никелевые жаропрочные сплавы.....	37
1.5. Стали.....	41
2. Переплавные процессы.....	52
3. Плавка и литьё алюминиевых сплавов.....	56
3.1. Особенности плавки алюминиевых сплавов.....	56
3.2. Особенности технологии фасонного литья алюминиевых сплавов.....	58
3.3. Изготовление слитков.....	60
4. Плавка и литьё магниевых сплавов.....	66
4.1. Особенности плавки магниевых сплавов.....	66
4.2. Особенности технологии фасонного литья магниевых сплавов.....	68
4.3. Производство слитков из магниевых сплавов.....	70
5. Плавка и литьё титановых сплавов.....	72
5.1. Особенности плавки титановых сплавов.....	72
5.2. Особенности технологии фасонного литья титановых сплавов.....	74
5.3. Производство титановых слитков.....	78
6. Плавка и литьё сталей и жаропрочных сплавов на никелевой основе.....	82
Библиографический список.....	84
Приложение 1.....	85
Приложение 2.....	89

ПРЕДИСЛОВИЕ

Различные отрасли современного машиностроения, в частности аэрокосмическая, судостроительная и другие технологии, требуют применения металлов и сплавов с высоким комплексом физико-механических и технологических свойств. Указанные материалы ответственного назначения можно получать с помощью современных технологических процессов выплавки и литья как фасонного, так и заготовительного. Материалы и процессы их производства составляют основу при обучении студентов по соответствующим специальностям. Однако в учебной литературе недостаточно освещены современные процессы выплавки и литья. При этом ощущается острый дефицит в издаваемой учебной литературе.

В главе 1 приводятся составы, свойства литейных сплавов и сталей и их применение. Расширены и уточнены свойства сплавов, дополнены данными, необходимыми конструкторам, технологам и металлургам. При этом рассмотрены классификация, химический состав, механические и физические свойства, технологические данные литейных и гранулируемых алюминиевых, магниевых, титановых, жаропрочных никелевых сплавов и литейных сталей.

В различных отраслях машиностроения применяются прогрессивные процессы выплавки и литья, которые пока не нашли отражения в имеющейся учебной литературе. В связи с этим автор поставил задачу рассмотреть прогрессивные процессы выплавки и литья, позволяющие обеспечить выпуск высококачественных изделий ответственного назначения.

В главе 2 рассмотрены переплавные процессы.

В главах 3-6 последовательно изложены технологические особенности плавки и литья алюминиевых, магниевых, титановых и жаропрочных никелевых сплавов и сталей. При этом рассмотрены технологические процессы как фасонного, так и заготовительного литья и выпечная обработка.

Термическая обработка изделий из различных сплавов в отдельный раздел пособия не выделена, т.к. конкретные режимы термической обработки изделий приведены в соответствующих разделах пособия. Тео-

рия и практика термической обработки широко освещена в имеющейся учебной литературе.

Прогресс в области аэрокосмического производства определяется как уровнем эксплуатационных характеристик применяемых материалов, так и совершенством технологии. Постоянная тенденция увеличения весовой отдачи при одновременном повышении коэффициента использования металла привела в последние годы к возрастанию массы литых деталей, усложнению конфигурации уменьшению толщины стенок отливок. Освоение технологии крупногабаритного литья выявило определенные проблемы. Необходимый уровень плотности отливок достигается в основном за счет увеличения технологических напусков.

Успешное решение задачи повышения эффективности производства, ресурса и надежности литых деталей возможно на основе комплексного подхода к решению проблемы: совершенствования технологии плавки и очистки расплавов от включений вредных примесей, особенностей построения литниково-питающих систем. При этом для обеспечения необходимых эксплуатационных свойств материалов определяющим является изучение вопросов, связанных с закономерностями формирования структуры в процессе изготовления литых изделий.

Учебное пособие завершается библиографическим списком и приложениями.

Пособие посвящается светлой памяти Людмилы Александровны Пановой и Вячеслава Васильевича Уварова

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

1. Механические и физические свойства металлов и сплавов

Свойства	Обозначения	Единица измерения	Перевод в систему СИ
Модуль нормальной упругости при растяжении, определенный статическим методом	E	кгс/мм ²	1 кгс/мм ² = 9,8 МПа
Модуль касательной упругости, определенный статическим методом	G	кгс/мм ²	1 кгс/мм ² = 9,8 МПа
Предел прочности при растяжении	σ_b	кгс/мм ²	1 кгс/мм ² = 9,8 МПа
Предел пропорциональности при растяжении	$\sigma_{пц}$	кгс/мм ²	1 кгс/мм ² = 9,8 МПа
Условный предел текучести при растяжении (остаточная деформация 0,2%)	$\sigma_{0,2}$	кгс/мм ²	1 кгс/мм ² = 9,8 МПа
Сопротивление срезу		кгс/мм ²	1 кгс/мм ² = 9,8 МПа
Предел выносливости при изгибе гладкого образца при симметричном цикле	σ_{-1}	кгс/мм ²	1 кгс/мм ² = 9,8 МПа
Предел длительной прочности при высоких температурах (напряжение, приводящее образец к разрушению за определенное число часов: 100, 300 и т.д.)	σ_{100} σ_{300}	кгс/мм ²	1 кгс/мм ² = 9,8 МПа
Твердость по Бринеллю	HB	кгс/мм ²	1 кгс/мм ² = 9,8 МПа
Твердость по Виккерсу	HV	кгс/мм ²	
Твердость по Роквеллу (г)	HRC		
Удельная ударная вязкость при изгибе	KCU	кгс/мм ²	1 кгс·м/см ² = =9,8·10 ⁴ Дж/м ²
Относительное удлинение после разрыва на длине 5d и 10d	δ_5, δ_{10}	%	
Коэффициент Пуассона	μ	-	
Относительное сужение шейки после разрыва	ψ	%	
Плотность	γ	кг/м ³	1 г/см ³ = 10 ³ кг/м ³
Коэффициент термического линейного расширения	α	1/град	1К = 1град
Коэффициент теплопроводности	λ	Вт/(м·град)	1 кал / (см·с·град) = =4,18 Вт/(м·град)
Удельная теплоёмкость	c	кДж/(кг·град)	1 кал/(г·град) = =4,18 кДж/(кг·град)

2. Условные обозначения способов литья

З - литьё в песчаные формы;

О - литьё в оболочковые формы;

В - литьё по выплавляемым моделям;

К - литьё в кокиль;

Д - литьё под давлением;

ПД - литьё с кристаллизацией под давлением (жидкая штамповка).

3. Маркировка элементов в алюминиевых сплавах

А - алюминий; К - кремний; Су - сурьма; Мг - магний; М - медь; Н - никель; Кд - кадмий; Мц - марганец; Ц - цинк; Ч - чистый; ПЧ - повышенной чистоты; ОЧ - особо чистый; Л - литейный; М - сплав модифицирован.

4. Условные обозначения видов термической обработки алюминиевых сплавов

T1 - искусственное старение без предварительной закалки;

T2 - отжиг;

T4 - закалка;

T5 - закалка и кратковременное (неполное) искусственное старение;

T6 - закалка и полное искусственное старение;

T7 - закалка и стабилизирующий отпуск;

T8 - закалка и смягчающий отпуск.

5. Условные обозначения видов термической обработки магневых литейных сплавов

T1 - старение;

T2 - отжиг;

T4 - гомогенизация и закалка на воздухе;

T6 - гомогенизация, закалка на воздухе и старение;

T61 - гомогенизация, закалка в воде и старение.

1. ЛИТЕЙНЫЕ СПЛАВЫ

В машиностроении широко применяются литейные марки сплавов на основе Al, Mg, Ti, Ni и др. металлов, а также легированные стали. Ниже рассмотрены химические составы, свойства и области применения литейных сплавов и сталей.

1.1. Алюминиевые сплавы. Маркировка

Основными легирующими элементами алюминиевых сплавов являются Cu, Mg, Zn, Si, Li и др. В зависимости от способа получения полуфабрикатов и изделий алюминиевые сплавы разделяют на деформируемые и литейные. Из деформируемых сплавов получают полуфабрикаты и изделия методами обработки металлов давлением (ОМД), а из литейных - фасонные отливки. Деформируемые и литейные сплавы разделяют на термически упрочняемые и термически неупрочняемые.

К специальным алюминиевым сплавам относят сплавы, из которых изготавливают изделия без применения традиционных технологических приемов (ОМД и литье), но с применением таких технологических процессов, как порошковая металлургия и гранулирование. Спеченные алюминиевые порошки (САПы) и сплавы (САСы) содержат в качестве легирующих компонентов дисперсные и равномерно распределенные в алюминиевой матрице нерастворимые твердые фазы (Al_2O_3 , Al_3Cr , Al_7Cr , Al_3Fe). Таким образом, в этих сплавах легирующими элементами являются либо Al_2O_3 , либо тугоплавкие практически нерастворимые в твердом растворе металлы Cr, Zr, Fe, Ni и др.

Технологический процесс изготовления полуфабрикатов из спеченных алюминиевых сплавов и порошков включает получение порошков, холодное брикетирование, вакуумную дегазацию брикетов, горячую подпрессовку брикетов, горячую и последующую холодную деформацию. Поэтому САПы и САСы могут быть отнесены к деформируемым алюминиевым сплавам.

Гранулируемые алюминиевые сплавы получают методом центробежного литья в воду частиц размером от десятых долей до нескольких миллиметров. При высоких скоростях кристаллизации ($10^3 - 10^6$ °C/с)

в сплавах алюминия с переходными металлами (Mn, Cr, Ti, V) можно получать перенасыщенные растворы, в которых содержание легирующих элементов значительно превышает их предельную растворимость. При изготовлении из гранул деформированных полуфабрикатов аномально пересыщенные твердые растворы распадаются с выделением дисперсных частиц интерметаллидов.

Литейные алюминиевые сплавы подразделяются в зависимости от химического состава на следующие группы:

I - сплавы на основе системы Al-Si-Mg: АК12(АЛ2); АК9Ч(АЛ4); АК7Ч(АЛ9); АК8Л(АЛ34) и др.; основная упрочняющая фаза Mg_2Si ;

II - сплавы на основе системы Al-Si-Cu: АК5М(АЛ5); АК8М(АЛ32); АК5М7; АК8М3Ч(ВАЛ8); АК12М2МгН(АЛ25); АК12ММгН(АЛ30) и др.; основные упрочняющие фазы $CuAl_2$ и Mg_2Si ;

III - сплавы на основе системы Al-Cu: АМ5(АЛ19); АМ4,5Кд(ВАЛ10) и др.; основная упрочняющая фаза $CuAl_2$;

IV - сплавы на основе системы Al-Mg: АМг5К(АЛ13); АМг11(АЛ22); АМг6Л(АЛ23); АМг6ЛЧ(АЛ23-1); АМг10(АЛ27); АМг10Ч(АЛ27-1); АМг5Мц(АЛ28) и др.; основная упрочняющая фаза Al_8Mg_5 ;

V - сплавы на основе системы алюминий-прочие компоненты: АК7Ц9(АЛ11); АЦМг(АЛ24) и др.; в зависимости от химического состава упрочняющими фазами могут быть $CuAl_2$, Mg_2Si , Al_2CuMg и др.

В табл.1 приведен химический состав алюминиевых литейных сплавов, в табл. 2-6 механические, физические и технологические свойства, а также рекомендуемые режимы термической обработки области применения сплавов. В скобках указаны обозначения марок сплавов по ГОСТ 2685-75.

Составы и свойства гранулированных сплавов приведены в табл.7-10. Гранулируемый сплав 01419 относится к системе Al-Cr-Zr, химический состав в процентном отношении: Cr-1,3...1,8; V 13...1,8; Fe <0,3; Si <0,3; Al - остальное. Упрочняющие фазы: $Al_3Zr(Cr)$, Al_7Cr . Сплав 01419 объединяет положительные качества таких разных по назначению сплавов, как САП1, АМг6, 1201. Сплав 01419 применяют для изготовления различных изделий вместо САП1 для деталей, работающих при температурах до 400°C; для высокопрочных коррозионно-стойких сварных конструкций, работающих при нормальной темпера-

туре (вместо АМгб); для ответственных коррозионно-стойких сварных конструкций, работающих при температуре до 400°C, для которых ни один из стандартных сплавов не может быть применен.

Листы по сравнению с прессованными изделиями имеют пониженную пластичность при комнатной температуре и более низкую жаропрочность. Сплав 01419 имеет очень высокую коррозионную стойкость, не уступая при этом техническому алюминию. Сплав 01419 нечувствителен к кристаллизационным трещинам при сварке.

Несмотря на низкую пластичность листов из сплава 01419 штампуемость листового материала 01419 высокая (находится на уровне отожженного САП). Сплав удовлетворительно обрабатывается резанием. По жаропрочности при 350°C сплав 01419 не уступает САП и превосходит все остальные стандартные сплавы.

Гранулируемые сплавы с переходными металлами (ПМ), имеющими значительную растворимость в алюминии, относятся к системам Al-Cr-Zr-ПМ с упрочняющими фазами $Al_3Zr(Cr)$, Al_7Cr , X-фаза с решеткой Al_6MP (в состав последней фазы входят Cr, Ti, V). Сплавы применяют при изготовлении прессованных полуфабрикатов, горяче- и холоднокатаных листов.

Многокомпонентный сплав на основе Al-Cr-Zr при суммарном содержании ПМ 4,6...5,0% значительно превосходит сплав 01419 по жаропрочности ($\sigma = 7,0$ кгс/мм², тогда как для сплава 01419 $\sigma = 46$ кгс/мм²). Прочностные характеристики при 20°C ниже сплава 01419 на 2...3 кгс/мм². По коррозионной стойкости, свариваемости и технологичности при листовой штамповке многокомпонентный сплав на основе Al-Cr-Zr мало отличается от сплава 01419.

Гранулируемые сплавы, легированные железом, содержат (2-8) % Fe (ост. Al) с упрочняющими фазами типа $Al_3Fe(Al_6Fe)$. Сплавы системы Al-Fe имеют очень высокую прочность (более высокую, чем у сплавов Al-Cr-Zr) и жаропрочность, но для них необходимо обеспечить скорость охлаждения частиц при кристаллизации не менее 10⁶ °C/с. Коррозионная стойкость находится на уровне коррозионной стойкости сплавов системы Al-Mg-Si. Сплавы Al-Fe не подвержены коррозии под давлением.

Таблица 1

Содержание основных компонентов алюминиевых литейных сплавов
(сумма учитываемых примесей приведена для отливок)

Группа сплавов	Марка сплава	Массовая доля, % основных компонентов							Сумма учитываемых примесей		
		магния	кремния	марганца	меди	титана	никеля	алюминия	З.В	К	д
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I Al-Si-Mg	AK12 (АЛ2)	-	10-13	-	-	-	-	Остальное	2,1	2,2	2,7
	AK9Ч (АЛ4)	0,17-0,30	8-10,5	0,2-0,5	-	-	-	»	1,1	1,4	1,5
	AK7Ч (АЛ9)	0,2-0,4	6,0-8,0	-	-	-	-	»	1,1	1,5	2,0
	AK8Л (АЛ 34)	0,35-0,55	6,5-8,5	-	-	0,1-0,3	Бериллий 0,15-0,4	»	1,0	1,0	-
II Al-Si-Cu	AK5М (АЛ5)	0,35-0,6	4,5-5,5	-	1,0-1,5	-	-	»	1,0	1,3	1,7
	AK8М (АЛ32)	0,3-0,5	7,9-9	0,3-0,5	1,0-1,5	0,1-0,3	-	»	0,9	1,0	1,1
	AK8МЗЧ (ВАЛ8)	0,2-0,45	7,0-8,5	Цинк 0,5-1,0	2,5-3,5	0,1-0,25	Бор 0,005-0,1	»	0,6	0,6	0,6
	AK5М7 (АЛ 10В)	0,2-0,5	4,5-6,5	-	6,0-8,0	-	-	»	2,7	2,7	3,0
	AK12ММГН (АЛ30)	0,8-1,3	11-13	-	0,8-1,5	-	0,8-1,3	»	-	1,1	-
	AK12М2МГН (АЛ25)	0,8-1,3	11-13	0,3-0,6	1,5-3,0	0,05-0,20	0,8-1,3	»	-	1,3	-
III Al-Cu	AM5 (АЛ 19)	-	-	0,6-1,0	4,5-5,0	0,15-0,35	-	»	0,2	0,3	-
	AM4, 5Кд (ВАЛ10)	-	-	0,35-0,8	4,5-5,5	0,15-0,35	Кадмий 0,07-0,25	»	0,15	0,15	-
IV Al-Mg	AMr5K (АЛ 13)	4,5-5,5	0,8-1,3	0,1-0,4	-	-	-	»	0,6	0,6	1,8
	AMr5Mц (АЛ28)	4,8-6,3	-	0,4-0,1	-	-	-	»	0,5	0,6	0,7
	AMr6Л (АЛ23)	6,0-7,0	Цирконий 0,05-0,20	Бериллий 0,02-0,10	-	0,05-0,15	-	»	0,20	0,20	-
	AMr10 (АЛ27)	9,5-10,5	Цирконий 0,05-0,20	Бериллий 0,05-0,15	-	0,05-0,15	-	»	0,20	0,20	0,20
	AMr11 (АЛ22)	10,5-13,0	0,8-1,2	-	-	0,05-0,15	Бериллий 0,003-0,007	»	0,5	1,0	1,2
	AMr6ПЧ (АЛ23-1)	6,0-7,0	Цирконий 0,05-0,20	Бериллий 0,02-0,10	-	0,05-0,15	-	»	0,05	0,05	-
	AMr10Ч (АЛ27-1)	9,5-10,5	-	-	-	0,05-0,15	-	»	0,2	0,2	0,9
V A I- прочие компоненты	AK7Ц9 (АЛ 11)	0,1-0,3	6,0-8,0	Цинк 7,0-12,0	-	-	-	»	17	1,9	2,5
	AC4Mg (АЛ24)	1,5-2,0	Хром 0,2-0,5	0,2-0,5	Цинк 3,5-4,5	0,1-0,2	-	»	0,9	-	-

Таблица 2

Механические свойства алюминиевых сплавов при комнатной температуре

Группа сплава	Марка сплава	Способ литья	Состояние, вид термообработки	σ_0	δ	НВ,	$\sigma_{0,2}$	E,	G,	M	KCU,
				кгс/мм ²	%	кгс/мм ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I	AK12 (AL2)	ЗМ,ОМ,ВМ,КМ	-	15	4	50	8	7000	2700	0,33	0,5
		К	-	16	2	50	12	-	-	-	-
		Д	-	16	1	50	-	-	-	-	-
		ЗМ,ОМ,ВМ,КМ	T2	14	4	50	-	-	-	-	-
		К	T2	15	3	50	-	-	-	-	-
		Д	T2	15	2	50	-	-	-	-	-
	AK94 (AL4)	З,О,В,КД	-	15	2	50	16	7000	2800	0,33	-
		К,Д	T1	20	1,5	60	-	-	-	-	-
		ЗМ,ОМ,ВМ,К,КМ	T6	23	3	70	20	7000	2700	0,33	0,4
	AK74 (AL9)	К,КМ	T6	27	3	70	-	-	-	-	-
		З,О,В,К	-	16	2	50	-	-	-	-	-
		Д	-	17	1	50	-	-	-	-	-
		З,О,В,КД	T2	14	2	45	-	-	-	-	-
		КМ	T4	19	4	50	-	-	-	-	-
		З,О,В	T4	18	4	50	-	-	-	-	-
		К,КМ	T5	21	2	60	-	-	-	-	-
		З,О,В	T5	20	2	60	-	-	-	-	-
		ЗМ,ОМ,ВМ	T5	20	2	60	11	7000	2700	0,31	-
	ЗМ,ОМ,ВМ	T6	23	1	70	-	-	-	-	-	
	ЗМ,ОМ,ВМ	T7	20	2	60	-	-	-	-	-	
	ЗМ,ОМ,ВМ	T8	16	3	55	-	-	-	-	-	
AK84 (AL34)	З	T5	30	2	85	-	-	-	-	-	
	З	T4	26	4	70	-	-	-	-	-	
	К	T5	34	4	90	-	-	-	-	-	
	К	T4	28	6	80	-	-	-	-	-	
AK5M	З,О,В,К	T1	16	0,5	65	-	-	-	-	-	
	З,О,В	T5	20	0,5	70	18	7000	-	-	0,3	
	К	T6	22	0,5	70	-	-	-	-	-	
	З,О,В	T6	23	0,5	70	-	-	-	-	-	
З,О,В,К	T7	18	1	65	-	-	-	-	-		
II	AK8M (AL32)	З	T6	25	1,5	60	-	-	-	-	-
		К	T1	20	1,5	70	-	-	-	-	-
		К	T6	27	2	70	-	-	-	-	-
		Д	-	26	2	70	-	-	-	-	-
		З	T5	24	2	60	-	-	-	-	-
		К	T5	26	2	70	-	-	-	-	-
		З	T7	23	2	60	-	-	-	-	-
		К	T7	25	2	60	-	-	-	-	-
	AK5M7 (AL10B)	З	-	13	-	80	-	7000	-	-	0,2
		К	-	16	-	80	-	-	-	-	-
		К	T1	17	-	90	-	-	-	-	-
		З	T1	15	-	80	-	-	-	-	-
	AK12M2MгH (AL25)	К	T1	19	-	90	-	-	-	-	-
	AK12MMгH (AL30)	К	T1	20	0,5	90	-	-	-	-	-
AK8M34	К	T4	35	5,0	90	-	-	-	-	-	
	К	T5	40	4,0	110	-	-	-	-	-	
	В	T5	35	2,0	90	-	-	-	-	-	
	Д	T5	35	2,0	90	-	-	-	-	-	
III	AM5 (AL19)	З,О,В,К	T4	30	8	70	16	7000	-	-	0,8
		З,О,В,К	T5	34	4	90	22	7000	-	-	-
		З	T7	32	2	80	-	-	-	-	-
AM4,5Kд	З,В	T4	30	10	70	-	-	-	-	-	
	К	T4	32	12	80	-	-	-	-	-	

		З,В	T5	40	7	90	-	-	-	-	-
		К	T5	44	8	100	-	-	-	-	-
		З,В	T6	43	4	110	-	-	-	-	-
		К	T6	50	4	120	-	-	-	-	-
IV	АМг5К (АЛ13)	З,О,В,К Д	-	15 17	1 0,5	55 55	10	6700	-	-	-
	АМГ11 (АЛ22)	З,О,В,К Д	T4	18 23 20	1 1,5 1	90 90 90	18	7000 7000	-	-	-
	АМг6Л (АЛ23)	З,О К,Д З,О,К	- - T4	19 22 23	4 6 6	60 60 60	-	-	-	-	-
	АМг6Л (АЛ23-1)	З,О К,Д З,О,К	- - T4	20 24 25	5 10 10	60 60 60	-	-	-	-	-
	АМГ10 (АЛ27)	З,О,К,Д	T4	32	12	75	-	-	-	-	-
	АМГ10Ч (АЛ27-1)	З,О,К,Д	T4	35	15	75	-	-	-	-	-
	АМг5Мц (АЛ28)	З,О,В К Д	- - -	20 21 21	4 5 3,5	55 55 55	-	-	-	-	-
V	АК7Ц9 (АЛ11)	З,О,В К Д	- - -	20 21 18	2 2 1	80 80 80	-	7200	-	-	-
	АЦМг (АЛ24)	З,О,В З,О,В	- T5	22 27	2 2	60 70	-	-	-	-	-

Таблица 3

Физические свойства алюминиевых литейных сплавов

Группа сплава	Марка сплава	Плотность, кг/м ³	Коэффициент термического линейного расширения $\alpha \cdot 10^5$, 1/град, при температурах, °С			Коэффициент теплопроводности λ , кДж/кг, при температурах, °С		Удельная теплоёмкость C , кДж/(кг·град), при температурах, °С		Удельное сопротивление $\rho \cdot 10^5$, Ом·см, при 20°С
			20...100	20...200	20...300	15	300	20	100	
I	АК12 (АЛ2)	2650	21,1	21,1	23,3	176,4	-	-	-	-
	АК9Ч (АЛ4)	2650	21,7	22,5	23,5	159,6	-	-	0,966	-
	АК7Ч (АЛ9)	2660	23,0	24,0	24,5	151,2	-	-	0,966	-
II	АК5М (АЛ5)	2680	23,1	-	24,0	159,6	176,4	-	-	0,0462
	АК5М7 (АЛ10В)	2780	22,3	-	24,4	168,0	176,4	-	-	0,046
	АК12М2МгН (АЛ25)	2720	19,0	-	20,5	159,6	159,6	-	-	0,050
III	АМ4,5Кд (АЛ19)	2780	19,5	-	25,6	105,6	142,8	-	-	-
IV	АМг5К (АЛ13)	2600	20,0	24,0	27,0	126,0	-	0,966	-	-
	АМГ11 (АЛ22)	2500	25,6	24,5	27,3	84,0	-	0,924	-	-
V	АК7Ц9 (АЛ11)	2400	-	24,4	-	-	-	0,882	-	-

Таблица 4

Литейные свойства алюминиевых сплавов

Группа сплава	Марка сплава	Температурный интервал кристаллизации, °С	Жидкотекучесть, мм		Усадка, %		Герметичность		Горячеломкость
			пруток	спираль	объемная	линейная	PN ₂ , МПа	PH ₂ O, МПа	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	AK12 (АЛ2)	577...577	420	820	3,0...3,5	0,9...1,0	>3,0	12,0: разрыв	<5
	AK9Ч (АЛ4)	601...569	360	800	3,2...3,4	1,0...1,1	>3,0	20,0: разрыв	<5
	AK7Ч (АЛ9)	620...577	350	770	3,7...3,9	1,0...1,2	>3,0	20,0: разрыв	<5
	AK8Л (АЛ34)	-	350	-	-	1,1	-	>30,0	<5
II III	AK5M (АЛ5)	622...570	340	750	4,5...4,9	1,1...1,2	>3,0	16,0: разрыв	7,5
	AK8M (АЛ32)	-	380	-	-	0,95	-	-	30,0
	AK5M7 (АЛ10В)	-	-	-	-	0,95...1,1	-	-	17,5
IV	AM5 (АЛ19)	650-548	205	-	6,0	1,25	0,5: течь	3,5: течь	32,5
	AMr11 (АЛ22)	-	380	650	4,7	1,2...1,25	0,5: течь	0,5: течь	17,5
	AMr6Л (АЛ23)	-	265	-	-	1,1	-	-	15,0
	AMr6ЛЧ (АЛ23-1)	-	265	-	-	1,1	-	-	15,0
	AMr10 (АЛ27)	-	270	-	-	1,1...1,2	-	-	16,5
	AMr10Ч (АЛ27-1)	-	270	-	-	1,1...1,2	0,5: течь	3,0: течь	16,5
	AM15Mц (АЛ28)	-	310	-	-	-	-	-	17,5
V	AK7Ц9 (АЛ11)	-	400	-	4,0...4,5	1,2...1,4	>3,0	1,50: разрыв	<5,0
	АЦMг (АЛ24)	-	230	-	4,5...4,7	1,2	2,0: течь	18,0: течь	22,5

Примечания: 1. Жидкотекучесть определялась по длине прямого прутка, отлитого в песчаную форму, и спирального прутка, отлитого в кокиль. Температура заливки 700°С.

2. Герметичность определялась минимальным давлением азота или воды, при котором в дне стакана толщиной 4 мм появлялась течь. Разрыв под давлением воды без течи характеризует гидропрочность.

3. Линейная усадка определялась в соответствии с ГОСТ 16817-71.

4. Горячеломкость определялась на образцах в виде плоских колец диаметром 107 мм и толщиной 5 мм. Ширина кольца в зависимости от размера стержня меняется от 50 до 5 мм через 2,5 мм. Сплав заливается в песчаную форму со стальным стержнем. Показатель горячеломкости — максимальная ширина кольца (мм), при которой появляются первые трещины. Чем больше эта ширина, тем более горячеломок сплав.

Таблица 5

Рекомендуемая термическая обработка литейных сплавов

Группа сплава	Марка сплава	Вид термообработки	Степень нагрева	Закалка			Искусственное старение			
				температура нагрева, °С	время выдержки, ч	охлаждающая среда	температура нагрева, °С	время выдержки, ч	охлаждающая среда	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
I	АК12 (АЛ2)	T2	-	-	-	-	370...380	2...4	воздух	
		T2	-	-	-	-	260...300	2...4	»	
		T2	-	-	-	-	180...220	2...4	»	
	АК9Ч (АЛ4)	T1	-	-	-	-	175±5	5...17	-	
		T6	-	535±5	30...40 мин	вода до 50...100°С	175±5	8...10	»	
	АК7Ч (АЛ9)	T6	-	535±5	то же	то же	195±5	30 мин	вода до 50...10°С	
		T2	-	-	-	-	370...380	2...4	воздух	
		T4	-	535±5	6...8	вода	-	-	-	
		T5	-	535±5	30...40 мин	20...60°С	175±5	8	воздух	
	АК8Л (АЛ34)	T6	-	535±5	2...6	то же	22±5	3...5	»	
T2		-	535±5	10...16	вода	175±5	-	-		
II	АК5М (АЛ5)	T4	-	535±5	10...16	20...100°С	175±5	6	воздух	
		T1	-	-	-	-	180±5	5...10	»	
		T6	-	525±5	3...5	вода	180±5	5...10	»	
	АК12М2Мг Н (АЛ25)	T7	-	525±5	3...5	20...100°С	230±5	3...5	»	
		T1	-	-	-	-	230±10	10...15	»	
	АК12ММгН (АЛ30)	T1	-	-	-	-	200±5	10...15	»	
	АК8М (АЛ32)	T6	-	505±5	2...3	вода 20...100°С	175±5	8	»	
	АК5М7 (АЛ10В)	T1	-	-	-	-	180±5	3...5	»	
	III	АМ5 (АЛ19)	T4	-	545+3	10...15	вода	-	-	-
			T6	I	530+3	5...9	20...100°С	175±5	3...6	воздух
T6			II	545±3	5...9	вода	175±5	3...6	»	
T7			-	545±3	10...13	80...100°С	250+10	3...10	»	
IV	АМг6Л (АЛ23)	T4	-	435±5	20	вода	-	-	-	
		T4	I	435+5	4	80...100°С	-	-	-	
		T4	II	460+5	4	то же	-	-	-	
	АМг10 (АЛ27)	T4	-	435+5	20	вода 90...100°С	-	-	-	
	АМг10Ч (АЛ27-1)	T4	I	435±5	4	вода	-	-	-	
		T4	II	460±5	4	90...100°С	-	-	-	
V	АЦ4Мг (АЛ24)	T1	-	-	-	вода 100°С	220+5	8...10	воздух	
		T5	-	580+5	4...6	или воздух	120±5	8...10	»	

Таблица 6

Технологические свойства и области применения
алюминиевых литейных сплавов

Группа сплава	Марка сплава	Температура литья, °С	Свариваемость	Обрабатываемость резанием	Склонность к газонасыщению	Коррозионная стойкость	Примечание
I	AK12 (AL2)	-	Удовлетворительная	-	-	Удовлетворительная	Детали сложной конфигурации, не несущие больших нагрузок
	AK9Ч (AL4)	-	»	Хорошая	Высокая	»	Крупные и средние детали, подверженные значительным нагрузкам и работающие под давлением
	AK7Ч (AL9)		»	Удовлетворительная	-		Детали средней нагруженности и сложной конфигурации, работающие под давлением
II	AK5M (AL5)	730	»	»	Средняя	»	Головки цилиндров для работы деталей до 250°С
	AK5M7 (AL10B)	700		Повышенная	»	Пониженная	Поршни для автофакторных двигателей, работающих до 250°С
III	AM5 (AL 19)	750	Хорошая	Хорошая	Пониженная	»	Высоконагруженные детали, работающие до 20°С, и другие детали, работающие до 300°С
IV	AMг5K (AL 13)	-	Удовлетворительная	Повышенная	-	Повышенная	Детали средней нагруженности
	AMг11 (AL22)	-	»	Хорошая	-	»	Детали, работающие в морской воде
V	AK7Ц9 (AL11)	-	Хорошая		Средняя	-	Детали, требующие специальных мер защиты от коррозии, сложной конфигурации, средней нагруженности

Таблица 7

Механические свойства прессованных прутков из сплава 01419
при различных температурах

T _{исп.} , °С	Механические свойства прессованных прутков при растяжении				σ ₁₀₀ , кгс/мм ²	КСУ, кгс / мм ²
	σ _в , кгс / мм ²	σ _{0,2} , кгс / мм ²	δ, %	ψ, %		
-196	63,7	51,0	16,0	30,5		4,8
20	34Л	30,6	14,5	28,5	-	4,4
200	18,8	18,5	20,6	51,4	-	-
250	15,5	15,0	24,8	55,1	9,2	6,8
300	11,0	10,4	15,4	57,6	-	-
350	9,7	8,4	18,4	56,7	4,6	6,4
400	7,9	7,5	18,1	63,8		
450	4,9	3,6	17,6	63,4		
500	3,3	2,6	20,8	64,8	1,5	6,8

Примечание. Предел выносливости на базе 10⁷ циклов при комнатной температуре составляет 110 МПа, а сопротивление повторно-статической нагрузки при σ_{max}=0,7 σ_в равно 10⁵.

Таблица 8

Механические свойства листов из сплава 01419 при различных температурах

Т _{исп.} , °С	σ _в , кгс / мм ²	σ _{0,2} , кгс / мм ²	δ, %
20	3,7	34,3	5,0
После отжига при 400 °С, 2ч			
-	33,3	29,6	8,1
250	14,5	10,6	21,2
350	8,2	5,0	35,0
500	1,7	-	52,5

Примечания. Технология получения листов:

1. Отливка гранул диаметром 1-3 мм на центробежной установке с охлаждением в воде.
2. Вакуумный отжиг.
3. Брикетирование при температуре вакуумирования.
4. Прессование полос сечением 13×150 мм.
5. Горячая прокатка полос на листы толщиной 2 мм.
6. Холодная прокатка листов до толщины 0,9 мм, σ₁₀₀=3,5 кгс/мм².

Таблица 9

Механические свойства прессованных прутков из многокомпонентного гранулированного сплава на основе системы Al-Cr-Zr

ΣГПМ, %	Т _{исп.} , °С	σ _в , кгс / мм ²	σ _{0,2} , кгс / мм ²	δ, %	σ ₁₀₀ , кгс/мм ²
3	220	30	22	26,8	-
	350	10	9	23,4	5,5
3,5	20	32	25	19,2	-
	350	10,5	10	27,7	6,0
4,0	20	33	27	19,2	-
	350	12	12	21,4	7,0
5,0	20	35	29	17,1	-
	350	14	14	21,2	7,0
7,0	20	29	22	4,0	-
	350	7	7	30,4	3,5

Таблица 10

Механические свойства прессованных из мелких гранул прутков сплавов Al-Fe

Сплав	σ _в , кгс / мм ²	σ _{0,2} , кгс / мм ²	δ, %	ψ, %
Al-7% Fe	30	23	17,6	42,4
Al-9% Fe	32,5/13	27/12,5	12,1/20,3	23,1/41,0

Примечания:

1. В знаменателе приведены значения параметров при 350 °С.
2. Технология получения полуфабрикатов: а) брикетирование гранул при 350 °С; б) обточка брикетов; в) нагрев до 380...400°С и прессование прутков диаметром 12 мм и полосы сечением 6×50мм (вытяжка соответственно 31 и 24).

Маркировка алюминиевых сплавов

А. Отечественная маркировка

Таблица 11

Классификация сплавов по некоторым признакам

Принцип классифицирования	Сплав	
	Название	Обозначение
По химическому составу	-	АМг, АМц
По названию сплава	Дюралюмин	Д1, Д16, Д19
По технологическому переделу	Ковочный	АК4, АК6, АК8
По свойствам	Высокопрочный	В92, В95, В96
По виду полуфабрикатов	Проволочный	АМг5П, Д18П
По методу получения заготовок и изделий	Спеченный	САП, САС
	Литейный	АЛ2, АЛ27-1

Для обозначения сплава в новой цифровой маркировке принята система из четырех цифр. Первая цифра - 1 обозначает основу всех сплавов - алюминий. Следующая цифра характеризует основной легирующий компонент или группу легирующих компонентов.

1 - сплавы систем Al-Cu-Mg; Al-Cu-Mg-Fe-Ni;

2 - сплавы систем Al-Cu-Mn; Al-Cu-Li-Cd-Mn;

3 - сплавы систем Al-Si; Al-Mg-Si-Cu;

4 - сплавы с главными легирующими компонентами, нерастворимыми или малорастворимыми в алюминии, т.е. систем Al-Mn; Al-Cr; Al-Ni; Al-Be, а также Al-Mg-Li;

5 - сплавы системы Al-Mg;

9 - сплавы систем Al-Zn-Mg; Al-Zn-Mg-Cu.

Третья и четвертая цифры маркировки определяют порядковый номер сплава данной группы. В большинстве случаев третья цифра или третья в совокупности со второй соответствует старой маркировке. Таким образом, в каждой группе может быть до ста сплавов.

В последнюю цифру вложена дополнительная нагрузка - деформируемые сплавы имеют последнюю нечетную цифру (и ноль), а литейные сплавы - четную. Металлокерамический способ производства полуфабрикатов из сплава характеризуется последней цифрой 9, проволочные сплавы обозначаются цифрой 7.

Для выделения опытных сплавов применяют букву «О», которую ставят перед единицей. Эта буква исключается из маркировки, когда сплав становится серийным. Пример цифровой маркировки приведен ниже:



Обозначение	Содержание
0 или нечетная цифра	деформируемый сплав
четная цифра	литейный сплав
9	металлокерамический
7	проволочный

Полуфабрикаты из деформируемых алюминиевых сплавов в зависимости от состояния поставки имеют следующую дополнительную буквенно-цифровую маркировку:

М - мягкий, отожженный;

Т - закаленный и естественно состаренный;

Т1 - закаленный и искусственно состаренные на максимальную прочность;

Т2 - закаленные и искусственно состаренные по смягчающему режиму для повышения вязкости разрушения;

Т3 - закаленные и искусственно состаренные по смягчающему режиму для повышения сопротивления коррозии под напряжением;

Т4 - закаленные (без старения);

Н - нагартованные (с деформацией 5-7%);

Н1 - усиленно нагартованные (с деформацией ~ 20%);

ТН - нагартованные после закалки и естественного старения;

П - полунагартованные;

ТН - закаленные, нагартованные и искусственно состаренные;

ТПП - профили повышенной прочности, закаленные и естественно состаренные;

ГК - горячекатаные (листы, плиты).

Для обозначения состояния поставки плакированных листовых полуфабрикатов используют следующую маркировку:

А - нормальная двухсторонняя плакировка;

Б - технологическая двухсторонняя плакировка;

У - утолщенная двухсторонняя плакировка.

Примечания:

1. Крупногабаритные поковки и штамповки и детали из них используют только в искусственно состаренном состоянии.

2. Возможно применение искусственного старения 170-175°C, 3 ч при условии обеспечения требуемого уровня механических свойств.

3. Данный режим старения используют для готовых сварных конструкций.

4. Время выдержек на первой стадии можно сократить до 10 ч, если перерыв между закалкой и искусственным старением составляет не менее трех суток.

5. Для получения оптимальных механических и коррозионных свойств время перерыва между закалкой и старением должно быть не более 10 суток.

6. Перерыв между закалкой и искусственным старением, обеспечивающий оптимальные механические свойства, не должен превышать 4 ч или быть больше 48 ч.

7. Данный режим старения используют для полуфабрикатов и деталей, предназначенных для кратковременной работы при повышенных температурах.

8. Данный режим старения используют для полуфабрикатов и деталей, предназначенных для длительной работы при повышенных температурах.

9. Данный режим старения используют для полуфабрикатов и деталей, подвергнутых деформации после закалки со степенью остаточной деформации 1-3%.

10. Данный режим старения используют для полуфабрикатов и деталей, подвергнутых деформации после закалки со степенью остаточной деформации 7-10%.

Б. Марки и обозначения состояния поставки зарубежных деформируемых алюминиевых сплавов

Для кодирования деформируемых алюминиевых сплавов Алюминиевая ассоциация (АА) США применяет систему в виде четырех цифр. (табл. 12) Она претендует на международную систему.

Таблица 12

Система кодирования состава деформируемых сплавов

АА	Основной сплавляемый элемент
1XXX	Алюминий минимальной чистоты 99,00%
2XXX	Медь
3XXX	Марганец
4XXX	Кремний
5 XXX	Магний
6XXX	Магний и кремний
7XXX	Цинк
8XXX	Другие элементы
9XXX	Неиспользованные серии цифр

Для более полной информации об алюминиевых сплавах в различных состояниях поставки введены характеристики их твердости, т.е. степени холодной или горячей обработки сплавов (табл. 13).

Таблица 13

Основные обозначения характеристик твердости, принятые в США

Буквенное обозначение	Состояние поставки (степень твердости)
F	Соответствует только изготовленному без дополнительной термической или иной обработки
O	Отожжен
H	Упрочнен деформированием
T	Термически обработан для получения стабильной степени твердости
W	Термически обработан. Для сплавов, прошедших естественный путь кристаллизации

В свою очередь, для более детальной характеристики полуфабрикатов или изделий предусмотрено подразделение кодов твердости сплавов (табл. 14):

Подразделение полуфабрикатов при упрочнении деформированием
и путем термической обработки

Обозначение	Степень твердости
Упрочнение деформированием	
H1	Упрочнен холодной деформацией (наклепом) без термического воздействия уменьшение степени наклепа определяется второй цифрой (1...8). Единица показывает наименьший наклеп, 8 - наибольший, H12 - четверть твердости наклепа, H14 - половину, H16 - три четверти, H18 - полностью наклепанный
H2	Упрочнен холодной деформацией и частично отожжен. Уменьшение твердости после отжига указывается второй цифрой (1 ...8), как и у H1
H3	Упрочнен холодной деформацией и стабилизирован термообработкой при низкой температуре. Уменьшение твердости до стабилизации указывается второй цифрой (1...8), как и у H1
Термическая обработка	
T1	Охлажден от повышенной температуры процесс горячей деформации и подвергнут естественному старению
T2	Охлажден от повышенной температуры процесса горячей деформации, подвергнут холодной деформации и последующему естественному старению
T3	Закалка на твердый раствор, деформирование в холодном состоянии с последующим естественным старением
T4	Закалка на твердый раствор с последующим естественным старением
T5	Охлажден от повышенной температуры процесса горячей деформации с последующим искусственным старением
T6	Закалка на твердый раствор с последующим искусственным старением
T7	Закалка на твердый раствор со стабилизацией
T8	Термообработка на твердый раствор, холодная деформация и искусственное старение
T9	Термообработка на твердый раствор, искусственное старение с последующей холодной деформацией
T10	Охлажден от повышенной температуры процесса горячей деформации, холодная деформация (наклеп) с последующим искусственным старением

Примеры маркировки:

- полуфабрикат из сплава 1060-H14, технический алюминий содержащий 99,6 % алюминия, упрочнен наклепом на половину от твердости исходного полуфабриката;

- полуфабрикат из сплава 2024-T4. Сплав, где в качестве ведущего легирующего элемента присутствует медь, подвергнут закалке с последующим искусственным старением.

В табл. 15 приведены номинальные составы распространенных деформируемых сплавов по системе Алюминиевой ассоциации (AA).

Таблица 15

AA				Состав содержания элементов в процентах			
	Al	Mn	Mg	Cu	Si	Cr	Другие
Без тепловой обработки							
Нелегированный алюминий							
1050	> 99,50	-	-	-	-	-	Си, Si, Fe
1060	> 99,60	-	-	-	-	-	Си, Si, Fe
1100	> 99,00	-	-	0,12	-	-	Si, Fe
1200	>99,00	-	-	-	-	-	Си, Si, Fe
Сплавы алюминий - марганец							
3003	98,6	1,2	-	0,12	-	-	-
3004	97,8	1,2	1,0	-	-	-	-
3105	99,0	0,55	0,50	-	-	-	-
Сплавы алюминий - магний							
5005	99,2	-	0,8	0,12	-	-	-
5050	98,6	-	1,4	-	-	-	-
5052	97,2	-	2,5	-	-	0,25	-
5083	94,7	0,7	4,4	-	-	0,15	-
5086	95,4	0,4	4,0	-	-	0,15	-
5154	96,2	-	3,5	-	-	0,25	-
5252	97,5	-	2,5	-	-	-	-
5454	96,3	0,8	2,7	-	-	0,12	-
5456	93,9	0,8	5,1	-	-	0,12	-
Термообработанные							
Сплавы алюминий - медь							
2011	93,7	-	-	5,5	-	-	0,4Bi, 0,4Pb
2014	93,5	0,8	0,5	4,4	0,8	-	-
2024	93,5	0,6	1,5	4,4	-	-	-
2219	93,0	0,3	-	6,3	-	-	0,06Ti, 0,1V, 0,18Zr
2618	93,7	-	1,6	2,3	0,18	-	1,1 Fe, 1,0Ni, 0,07Ti
Сплавы алюминий - магний - кремний							
6061	97,9	-	1,0	0,28	0,6	0,2	-
6063	98,9	-	0,7	-	0,4	-	-
6151	98,2	-	0,6	-	0,9	0,25	-
6262	96,8	-	1,0	0,28	0,6	0,09	0,6Bi, 0,6Pb
Сплавы алюминий - цинк - магний - медь							
7075	90,0	-	2,5	1,6	-	0,23	5,6 Zn
7178	88,1	-	2,7	2,0	-	0,26	6,8Zn

Как и в отечественной практике, упрочняющая термообработка заключается в нагреве до образования однородного твердого раствора (ниже линии солидуса) и фиксации пересыщенного раствора путем быстрого охлаждения (закалка). Затем в зависимости от условий поставки и назначения полуфабрикатов их подвергают естественному или искусственному старению.

1.2. Магниевые сплавы

Магниевые сплавы характеризуются малой плотностью, высокой способностью поглощения энергии удара и вибраций. Важное технологическое свойство магниевых сплавов - прекрасная обрабатываемость резанием. Один из основных недостатков - пониженная коррозионная стойкость.

Условно магниевые сплавы можно разделить на следующие группы:

I. Сплавы на основе системы Mg-Mn(МЛ12).

II. Сплавы на основе системы Mg-Al-Zn (МЛ4, МЛ4ПЧ, МЛ5, МЛ5ПЧ, МЛ6, МЛ7-1).

III. Сплавы, легированные цинком, редкоземельными металлами и цирконием (МЛ8, МЛ9, МЛН, МЛ12, МЛ15, ВМЛ5, ВМЛ6).

IV. Сплавы, содержащие торий и некоторые другие элементы (МЛ14, ВМЛ1 и др.).

По коррозионной стойкости магниевые сплавы можно разделить на три основные группы:

- повышенной коррозионной стойкости во всех климатических атмосферных условиях (МЛ4ПЧ, МЛ5ПЧ, ВМЛ9);

- удовлетворительной коррозионной стойкости во всех климатических атмосферных условиях (МЛ4, МЛ5, МЛ8, ВМЛ5, МЛ9, ВМЛ7, МЛ12, МЛ10, МЛ11, МЛ7-1);

- пониженной коррозионной стойкости во всех климатических атмосферных условиях (ВМЛ6).

По предельным рабочим температурам магниевые сплавы можно разделить на следующие группы:

- до 150°C и кратковременно до 200...250°C (МЛ4, МЛ4ПЧ, МЛ5, МЛ3ПЧ, МЛ6, ВМЛ6, ВМЛ5, ВМЛ9);

- до 150...200°C и кратковременно до 250°C (МЛ7-1, МЛ12, МЛ15), МЛ15 может работать кратковременно (до 5 минут) при нагреве до 350°C;

- до 200...300°C и кратковременно до 300...400°C (МЛ9, МЛ10, МЛ11, ВМЛ7).

Магниевые сплавы разделяют также на следующие группы:

- сплавы средней прочности (МЛ7-1);

- сплавы высокой прочности (МЛ4, МЛ4ПЧ, МЛ5, МЛ5ПЧ, МЛ6, МЛ8, МЛ12, МЛ15, ВМЛ5, ВМЛ6, ВМЛ9);

- жаропрочные сплавы (МЛ9, МЛ10, МЛ11, ВМЛ7).

Сплавы системы Mg-Mn. Структура этих сплавов представляет собой твердый раствор марганца в магнии с включением первичного марганца. Характерный представитель этой группы - сплав МЛ2. Сплав имеет узкий интервал кристаллизации (около 5°C), хорошую жидкотекучесть, большую осадку, низкие механические свойства. Введение в сплав 0,2% Са измельчает структуру и несколько улучшает механические характеристики. Термическая обработка сплава МЛ2 - отжиг при 340°C в течение 2-3 часов для снятия внутренних напряжений. Сплав имеет высокую коррозионную стойкость к плавиковой кислоте, концентрированным растворам едкого натрия и растворам соды. Сплав сваривается и хорошо обрабатывается резанием.

В состав МЛ2 входит 1,0-2,0% Mn. Плотность сплава при 20°C равна 1770 кг/м³. Температурный интервал кристаллизации 650...645°C, жидкотекучесть (по длине прутка) 300 мм, линейная усадка 1,7...1,9%. Механические свойства при комнатной температуре: $\sigma_b = 9,0$ кгс/мм², $\delta = 3,0\%$, HB = 30 кгс / мм².

Сплавы системы Mg-Al-Zn (табл. 16 – 21). Упрочняющими фазами этой системы являются соединения Mg₁₇Al₁₂ и Mg₃Al₂Zn₃.

Сплавы, легированные редкоземельными металлами и цирконием (табл. 22 – 27). Редкоземельные элементы (РЗЭ) заметно повышают жаропрочность магниевых сплавов, которая увеличивается по мере перехода от лантана к неодиму. Основой сплавов этой системы является твердый раствор РЗМ в магнии и эвтетика, состоящая из твердого раствора и химического соединения.

Сплавы, содержащие торий и некоторые другие элементы, приведены в табл. 28, 29. Высокая жаропрочность характерна для сплавов системы Mg-Th. Ввод в эти сплавы циркония приведет к измельчению зерна, повышению механических свойств и улучшению литейных характеристик.

Сплав МЛ14 упрочняется термообработкой, он отличается более высокими, чем у других магниевых сплавов, сопротивлением ползучести при температурах 350...400°C.

Сплав ВМЛ1 имеет наиболее высокую жаропрочность и удовлетворительные литейные свойства. Сплав применяется для изготовления отливок, работающих в условиях высоких нагрузок при температуре 350...400°C.

Таблица 16
Химический состав магниевых литейных сплавов системы Mg-Al-Zn, %

Марка сплава	Al	Zn	Mn	Mg	Ca	Si	Cu	Fe	Ni	Be	Zr	Сумма примесей
						не более						
МЛ4	5,0...7,0	2,0...3,0	0,15...0,5	Основная	-	0,25	0,1	0,06	0,01	0,002	0,002	0,5
МЛ4ПЧ	5,0...7,0	2,0...3,0	0,15...0,5	»	-	0,28	0,04	0,007	0,002	0,002	0,002	0,14
МЛ5	7,5...9,0	0,2...0,8	0,15...0,5	»	-	0,25	0,1	0,06	0,01	0,002	0,002	0,5
МЛ5ПЧ	7,5...9,0	0,2...0,8	0,15...0,5	»	-	0,08	0,04	0,007	0,001	0,002	0,002	0,14
МЛ6	9,0...10,2	0,6...1,2	0,1...0,5	»	-	0,25	0,1	0,07	0,01	0,002	0,002	0,5
МЛ7-1	5,0...6,5	0,3...0,7	0,3...0,6	»	0,2...0,5	0,25	0,1	0,1	-	-	-	-

Таблица 17
Механические свойства магниевых литейных сплавов системы Mg-Al-Zn при комнатной температуре

Марка сплава	Вид полуфабриката	Способ литья	Состояние	E	G	μ	$\sigma_{Tц}$	$\sigma_{0,2}$	σ_b	ψ	δ	$T_{0,2}$	KCU	σ_{-1} , кгс / мм ²	
				кгс / мм ²			кгс / мм ²			%	кгс / мм ²	образцы			
				5	6		8	9	10	11	12	13	14	15	16
МЛ4	отдельно отлитые образцы (Ø 12 мм)	3	без термообработки	-	1600	0,33	-	9,5	18,0	5,0	6,0	13,0	0,2	4,5	-
			закалённые (Т4)	4200	1600	0,33	1,8	8,5	25,0	9,0	13,0	13,5	0,4	-	-
			закалённые и состаренные (Т6)	4200	1600	0,33	4,5	11,5	25,5	6,0	8,0	14,5	0,2	8,0	7,0

Окончание табл. 17

МЛ5	отдельно отлитые образцы (Ø 12 мм)	3	без термообработки	4200	1600	0,34	-	9,5	16,0	3,0	4,0	-	-	4,5	-
			отожжённые (Т2)	4200	1600	0,34	-	8,0	16,0	5,0	6,0	12,0	0,2	-	-
			закалённые (Т4)	4200	1600	0,34	3,0	9,0	25,0	9,0	15,0	13,5	0,5	8,5	7,0
			закалённые и состаренные (Т6)	4200	1600	0,34	4,0	12,0	25,5	4,0	8,5	14,0	0,3	8,5	7,0
МЛ6	отдельно отлитые образцы (Ø 12 мм)	3	без термообработки	4200	-	0,33	-	11,0	16,0	1,5	2,5	-	-	6,0	4,5
			закалённые (Т4)	4200	-	0,33	-	10,0	25,0	5,0	12,0	-	-	9,5	7,5
			закалённые и состаренные (Т6)	4200	-	0,33	-	14,0	26,0	1,0	3,0	-	-	8,5	7,0
МЛ7-1	отдельно отлитые образцы (Ø 12 мм)	3	без термообработки и после термообработки по режиму Т2	4200	1550	0,35	-	7,0	18,0	6,0	7,0	-	-	-	-

Таблица 18

Физические свойства магниевых литейных сплавов системы Mg-Al-Zn

Марка сплава	Плотность, кг/м ³	Коэффициент термического линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, 1/град, при температурах, °С							Коэффициент теплопроводности λ , Вт / (м·град), при температурах, °С				Едельная теплоемкость, С, кДж/(кг·град) 20...100°С
		20	100	20...100	20...200	20...300	100...200	200...300	25	100	200	300	
МЛ4	1830	-	-	26,4	27,6	28,3	28,8	29,7	65	71,2	81,8	83,8	1,05
МЛ5	1810	-	-	26,8	28,1	28,7	29,4	29,9	65	71,2	77,6	79,7	1,05
МЛ6	1810	-	-	26,1	27,3	27,7	28,5	28,4	60,8	67,1	-	-	1,05
МЛ7-1	1760	-	-	27,4	27,7	27,8	28,1	28,1	79,9	83,8	88,0	92,1	-

Таблица 19

Технология литья магниевых литейных сплавов системы Mg-Al-Zn

Марка сплава	Способ литья	Температурный интервал кристаллизации, °С	Температура литья, °С	Линейная усадка, %	Жидкотекучесть (по длине прутка), мм	Горячее ломкость (по ширине кольца), мм	Герметичность
МЛ4	З,О	610...400	700...800	1,2...1,4	245	37,5	Удовлетворительная при отсутствии микропористости
МЛ5	О	600...430	720...780	1,0...1,2	290...300	30,0	То же
	К	600...430	720...780	-	-	-	»
	Д	600...430	720...780	-	-	-	»
	В,Г	600...430	720...760	-	-	-	»
МЛ6	З,О	600...430	720...760	-	-	-	»
	К,З,Д	600...420	720...780	1,1...1,2	330	27,5	»
МЛ7-1	З	640...505	720...800	1,2...1,5	250	32,5...37,5	Выше, чем у МЛ5

Примечания:

1. Литье сплава МЛ4 в кокиль не рекомендуется.
2. Сплав МЛ5 имеет малую прочность к образованию горячих трещин.
3. Сплав МЛ6 обладает хорошими литейными свойствами.
4. Сплав МЛ7-1 имеет удовлетворительные литейные свойства.

Таблица 20

Рекомендуемая термическая обработка магниевых литейных сплавов системы
Mg-Al-Zn

Марка сплава	Вид термообработки	Температура нагрева, °С	Выдержка, ч	Охлаждающая среда
МЛ4	Закалка (Т4)	380±5	8..16	Воздух
	Закалка и старение (Т6)	Зак. 380±5 Ст. 175±5	8..16 16	»
МЛ6	Закалка (Т4)	360±5 410±5	3 21..29	»
	Закалка и старение (Т6)	Зак. 360±5+ 410±5 Ст. 190±5	3 29 4.8	»
МЛ7-1	Закалка в воде и старение(Т61)	Зак. 360±5+ 410±5 Ст. 190±5	3 21..29 4..8	Вода 90 °С Воздух
	Отжиг (Т2)	325	5	»

Примечание. Подробнее по термообработке сплава МЛ5 в зависимости от группы литья см. в справочнике «Авиационные материалы» (Т.6, ОНТИ, 1973).

Таблица 21

Некоторые технологические и физические характеристики
магниевых литейных сплавов системы Mg-Al-Zn и их применение

Марка сплава	Свариваемость		Обрабатываемость резанием	Коррозионная стойкость	Примечание
	Метод сварки	Температура предварительного подогрева, °С			
1	2	3	4	5	6
МЛ4	Аргонно-дуговая и газовая	350..380	Отличная	МЛ4 - удовл. МЛ4ПЧ – повышенная	Корпусные детали и детали управления летательных аппаратов, корпуса приборов и инструментов
МЛ7	Аргонно-дуговая К газовая	350..380	Отличная	Удовлетворительная	Детали двигателя, нагревающиеся при эксплуатации до200°С

Таблица 22

Химический состав магниевых сплавов, легированных цинком,
РЗМ и цирконием, % по массе

Марка сплава	Zn	Zr	Cd	Mg	La	Nd	Ag	Jn	Не более							Проч. примеси	Сумма примес.
	Al	Si	Fe	Ni	Cu	Be	Zn										
МЛ8	5.5...6.6	0.7...1.1	0.2...0.8	Основа	-	-	-	-	0.02	0.03	0.01	0.005	0.03	0.001	-	0.12	0.2
МЛ12	4.0...5.0	0.6...1.1	-	»	-	-	-	-	0.02	0.03	0.01	0.005	0.03	0.001	-	0.12	0.2
МЛ15	4.0...5.0	0.7...1.1	0.2...1.2	»	0.6...1.2	-	-	-	0.02	0.03	0.01	0.005	0.03	-	-	0.12	
ВМЛ5	7.8...9.2	0.7...1.1	0.2...1.2	»	-	0.03...0.3	-	-	0.03	0.03	0.01	0.01	0.03	-	-	-	0.2 0.25
ВМЛ6	7.0...8.0	0.7...1.1	0.4...1.0	»	-	1.0...1.6	-	0.2...0.8	0.02	0.03	0.01	0.005	0.03	0.001	-	0.12	0.2
МЛ9	-	0.4...1.0	-	»	-	1.9...2.6	-	0.2...0.8	0.02	0.03	0.01	0.005	0.03	0.001	0.15	-	0.2
МЛ10	0.1...0.7	0.4...1.0	-	»	-	2.2...2.8	-	-	0.02	0.03	0.01	0.005	0.03	0.001		0.12	0.2
МЛ11	0.2...0.7	0.4...1.0	-	»	-	-	-	-	0.02	0.03	0.03	0.005	0.03	0.001	-	0.12	0.25

Таблица 23

Механические свойства при комнатной температуре магниевых литейных сплавов, легированных цинком, РЗМ и цирконием

Марка сплава	Вид полуфабриката	Способ литья	Состояние	E	G	μ	$\sigma_{лц}$	$\sigma_{0,2}$	σ_B	$t_{0,2}$	δ_{10}	ψ	KCU	σ_{-1}
				кгс / мм ²			кгс / мм ²				%		кгс / мм ²	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
МЛ8	отдельно отлитые образцы (∅ 12 мм)	3	закалённые и состаренные (Т6)	4200	1600	0,33	10	19	29	-	6	13	0,3	7,5
			закалённые и состаренные (Т61)	4200	1600	0,33	12	20	30	-	7	8	0,3	7,5
	образцы, вырезанные из отливок (∅ 6 мм)	3	закалённые и состаренные (Т6)	-	-	0,33	-	19	27	-	5	-	-	-
			закалённые и состаренные (Т61)	-	-	-	-	20	28	-	6	-	-	-
МЛ12	отдельно отлитые образцы (∅ 12 мм)	3	без термообработки	4400	1650	0,33	8	12	22	15,5	7	8	0,5	-
			состаренные (Т1)	4400	1650	0,33	9	15	26	15,5	6	7	0,4	7,5
	Образцы, вырезанные из отливок (∅ 6 мм)	3,К	то же	-	-	-	-	-	24	-	6	-	-	-
МЛ15	отдельно отлитые образцы (∅ 12 мм)	3	состаренные (Т1)	4300	1600	0,34	8	15	22	15	4	5	0,2	-
ВМЛ5	то же	3	закалённые и состаренные (Т61)	4200	1550	0,35	14	21	31	15	5	8	0,3	-
ВМЛ6	отдельно отлитые образцы (∅ 12 мм)	3	закалённые и состаренные (Т6)	4300	1600	0,34	17	25	34	-	7	12	0,28	9,0
			образцы, вырезанные из отливок (∅ 6 мм)	3,К	то же	-	-	-	-	24	33	-	7	-
		3,К	»	-	-	-	-	25	34	-	8	-	-	-
МЛ9	отдельно отлитые образцы (∅ 12 мм)	3	»	4300	1600	0,34	6	12	25	17	6	8	0,65	6
МЛ15	отдельно отлитые образцы (∅ 12 мм)	3	состаренные (Т1)	4300	1600	0,34	8	15	22	15	4	5	0,2	-
МЛ10	то же образцы, вырезанные из отливок (∅ 6 мм)	3	Т6	4200	1650	0,33	10	15	25	18	5	7	0,5	-
			Т61	4200	1650	0,33	10	17	27	18	5	7	0,5	-
		3,О 3,О К К	Т6	-	-	-	-	-	14	23	-	7	-	-
			Т61	-	-	-	-	-	15,5	24	-	-	-	-
			Т6	-	-	-	-	-	15	25	-	-	-	-
МЛ11	отдельно отлитые образцы (∅ 12 мм)	3	отожжённые (Т2)	4200	1600	-	4	10,0	13	-	3	3,5	-	-
			закалённые (Т4) (Т6)	4200 4200	1600 1600	- -	4 4,5	9 10,5	15 16	12 12	5 3	7 5	- -	7 -
МЛ17	отдельно отлитые образцы (∅ 12 мм)	3,О К,В,Г	Т61	-	-	-	-	13	19,5	-	2	-	-	-
				-	-	-	-	19	27	-	2	-	-	-
МЛ18	то же	то же	Т6	-	-	-	-	24	29	-	3	-	-	-
			Т61	-	-	-	-	25	30	-	3,5	-	-	-
МЛ19	»	»	Т6	-	-	-	-	12	18	-	2,5	-	-	-

Таблица 24

**Физические свойства магниевых литейных сплавов, легированных цинком,
РЗМ и цирконием**

Марка сплава	Плотность, кг/м ³	Коэффициент термического линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, 1/град, при температурах, °С					Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·град), при температурах, °С				Удельная теплоемкость C , кДж/(кг·град), при температурах, °С				Удельное сопротивление $\rho \cdot 10^8$, Ом·см при 20°С
		20...100	20...200	20...300	100...200	200...300	25	100	200	300	100	200	300	400	
МЛ 8	1820	26,6	27,2	27,8	27,8	28,0	123	125	127	130	-	-	-	-	-
МЛ12	1810	26,2	27,8	28,9	29,5	31,2	134	130	130	-	-	-	-	-	
МЛ15	1830	25,9	26,9	27,9	27,9	29,8	138	134	130	125	0,92	1,0	1,13	1,21	
ВМЛ5	1890	27,6	27,9	28,3	28,3	29,2	126	128	130	121	0,921	1,05	1,17	5,41	
ВМЛ6	1930	27,1	27,6	28,0	28,0	28,9	167	146	125	121	1,09	1,17	1,94	-	
МЛ9	1760	27,7	28,0	28,3	28,3	29,0	117	117	117	122	-	-	-	7,26	
МЛ10	1780	27,7	28,0	28,3	28,3	29,0	113	113	113	113	0,963	1,05	1,13	1,21	
МЛ11	1800	21,9	22,7	24,8	23,5	25,0	105	109	113	117	-	-	-	-	

Таблица 25

**Технология литья магниевых литейных сплавов, легированных цинком,
РЗМ и цирконием.**

Марка сплава	Способ литья	Температурный интервал кристаллизации, °С	Температура литья, °С	Линейная усадка, %	Жидкотекучесть (по длине прутка), мм	Горячеломкость (по ширине кольца), мм	Герметичность
МЛ8	З,К,О	635...525	720...800	1,3...1,4	290	30...32,5	Повышенная по сравнению с МЛ5
МЛ12	З К О В,Г	644...550	740...800 720...800	1,3...1,4	290	30...32,5	Повышенная
МЛ15	З	630...539	720...790	1,2...1,5	320	27,5...30	>300 атм. при гидроиспытании
ВМЛ5	З	625...460	720...800	1,2...1,4	300...330	27,5...30	Повышенная по сравнению с МЛ5
ВМЛ6	З,К,О	620...415	720...800	1,2...1,4	315	17,5...30	Повышенная
МЛ9	З К	650...558	720...800 720...800	1,2...1,4 1,2...1,4	250 -	25 -	»
МЛ10	З К	640...550	720...800 680...780	1,2...1,5 1,2...1,5	250 -	15...20 -	»
МЛ11	З К	645...590	720...800 680...780	1,2...1,5 1,2...1,5	290 -	20 -	Повышенная по сравнению с МЛ5

Таблица 26

Рекомендуемая термическая обработка магниевых литейных сплавов,
легированных цинком, РЗМ и цирконием

Марка сплава	Вид термообработки и маркировка	Температура нагрева, °С	Выдержка, ч	Охлаждающая среда
1	2	3	4	5
МЛ8	Закалка и старение (Т6)	Закалка с 490+5	5	Сжатый воздух Воздух Горячая вода (90°+10°) Воздух
	Закалка и старение (Т6)	Старение при 165+5 или 130+5 То же	24(28) 5 24(28)	
МЛ12	Старение (Т1)	300±5	4...6	»
МЛ15	Старение (Т1)	То же	2...6	»
ВМЛ5	Закалка и старение (Т61)	Закалка с 440-10+440+10 (двухступ. нагр.)	4...8 ч+10...30 мин	Вода 80...90°С или масло 20...30°С Воздух
		Старение при 150+10	24...50	
ВМЛ5	Закалка и старение (Т6)	Закалка с 440-10	4...8	Обдув сжатым воздухом Воздух
		Старение при 150+10	24...50	
ВМЛ6	Закалка и старение (Т6)	Закалка с 430±5	8	Сжатый воздух Воздух Вода (90°+ 10°) Воздух
		Старение при 130+5	48	
		Закалка с 430+5 Старение при 130±5	8 48	
МЛ9	Закалка и старение (Т6)	Закалка с 540±5	8...12	Сжатый воздух Воздух
		Старение при 200±5	6...12	
МЛ10	То же Закалка и старение (Т61)	Закалка с 540±5 Старение при 205+5	8...12	Сжатый воздух Воздух Вода > 80° Воздух
			4...8	
			8...12	
МЛ11	Отжиг (Т2) Закалка (Т4)	325+5	3...5	Воздух Сжатый воздух Воздух
		570+5	4...6	
		Старение при 200±5	2...16	

Таблица 27

Некоторые технологические и физические характеристики магниевых сплавов,
легированных цинком, РЗМ и цирконием

Марка сплава	Свариваемость		Обрабатываемость резанием	Коррозионная стойкость	Примечание
	Метод сварки	Температура предварительного подогрева, °С			
1	2	3	4	5	6
МЛ 8	Аргонно-дуговая	400...440	Отличная	Удовлетворительная	Высоконагруженные детали (кронштейны, фермы, детали управления, барабаны)
МЛ12	»	400...440	»	»	Нагруженные детали длительно работающие до 200°С и кратковременно до 250°С
МЛ15	»	до 440	»	»	Нагруженные детали, длительно работающие до 200°С и кратковременно до 350°С, детали высокой герметичности
ВМЛ5	»	400...440	»	»	Нагруженные детали, длительно работающие до 150°С и кратковременно до 200°С
ВМЛ6	»	400...420	»	Пониженная	Высоконагруженные детали, длительно работающие до 15СГС и кратковременно до 200°С
МЛ9	»	400...440	»	Удовлетворительная	Детали, длительно работающие до 250...300°С, кратковременно до 350...400°С
МЛ10	»	400...440	»	»	Нагруженные детали, длительно работающие до 250°С, кратковременно до 350°С, детали высокой герметичности; детали с высокой стабильностью размеров
МЛ 11	»	400...440	»	»	Детали двигателя, нагревающиеся при работе до 250...300°С, а также детали повышенной герметичности

Таблица 28

Химический состав магниевых литейных сплавов, содержащих торий и другие элементы, % по массе

Марка сплава	Zr	Th	Zn	Mg	Si	Cu	Ni	Fe	Сумма примесей
					не более				
МЛ11	0,5...1,0	2,6...3,8	1,7...2,3	Основа	0,2	0,03	0,005	0,01	0,065
ВМЛ1	0,5...1,0	2,5...4,0	-	»	0,2	0,03	0,005	0,01	0,065

Таблица 29

Некоторые свойства магниевых литейных сплавов, легированных торием

Марка сплава	Плотность, кг/м ³	Жидкотекучесть (по длине прутка), мм	Горячеломкость (по ширине кольца), мм	Линейная усадка, %
МЛ11	1840	230	25...30	1,3... 1,5
ВМЛ1	1790	230	-	1,3... 1,5

1.3. Титановые сплавы

Титановые сплавы имеют малую плотность, высокие механические свойства от криогенных (-250°C) до умеренно высоких температур (300...600°C) и отличную коррозионную стойкость в большинстве агрессивных сред. Жаропрочные титановые сплавы работают при температуре до 500°C - 3000 ч, при 600°C не более 500 ч.

Титановые сплавы классифицируются по структуре в отожженном состоянии (α -сплавы, ($\alpha+\beta$)-сплавы и β -сплавы), по способу изготовления, уровню прочности и целевому назначению. По уровню прочности и жаропрочности титановые сплавы можно разделить на группы:

- I. Сплавы повышенной пластичности (BT 1-0, OT4-0, OT4-1).
- II. Сплавы средней прочности (BT5 и BT5-1, OT4, BT4, BT20).
- III. Высокопрочные сплавы (BT6, BT14, BT15, BT22).
- IV. Жаропрочные сплавы (BT31, BT8, BT9, BT18).

В качестве литейных наиболее широко применяются - сплав BT5Л, двухфазные сплавы BT-3-1Л, BT6Л, BT9Л, BT14Л и псевдосплавы BT20Л и BT21Л. Для фасонного литья чаще всего применяется сплав BT5Л ($\sigma_b > 70$ кгс/мм²). Остальные литейные сплавы имеют предел

прочности 85...95 кгс/мм². Необходимо учесть, что литейные титановые сплавы имеют предел выносливости на 40...60% ниже деформируемых сплавов и более низкую пластичность.

Почти все деформируемые титановые сплавы могут применяться в качестве литейных, так как обладают хорошими литейными свойствами. Поэтому в данном пособии также приведен химический состав деформируемых титановых сплавов. В табл. 30-36 приведены сплавы, свойства, режимы термической обработки и другие данные титановых сплавов.

Таблица 30

Химический состав и стандартные свойства некоторых деформируемых титановых сплавов

Марка сплава	Состав, % по массе							Вид полуфабриката	Состояние	E _t МПа	σ _b МПа	δ ₅ %
	Al	Zn	V	Mo	Cr	Si	Прочие					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
α-сплавы												
BT5	4,3-6,2	-	-	-	-	-	-	Профиль	Отжиг	110000	750-950	8-16
BT5-1	4,0-6,0	-	-	-	-	-	2,0-3,0	Штампов.	щ	110000	750-950	10
Псевдо-α-сплавы												
OT4-0	0,2-1,4	-	-	-	-	-	0,2-1,3 Mn	Листы	Отжиг	110000	500-650	30
OT4	3,5-5,0	-	-	-	-	-	0,8-2,0 Mn	»	»	110000	700-900	10-20
BT20	5,5-7,0	1,4-2,5	0,8-2,3	0,5-1,8	-	-	-	»	»	110000	900-1100	7-13
(α + β)-сплавы												
BT6	5,3-6,6	-	3,5-5,3	-	-	-	-	Листы штампов.	Отжиг	120000	950-1100	8-13
BT14	3,5-6,3	-	0,9-1,9	2,5-3,8	-	-	-	Листы	»	115000	930-1100	10
BT9	5,8-7,0	0,8-2,5	-	2,8-3,8	-	0,2-0,35	-	»	»	115000	1100-1300	8-14
BT22	4,5-5,9	-	4,0-5,5	4,0-5,5	0,5-2,0	-	0,5-1,5 Fe	Прутки	»	115000	1100-1250	8
Псевдо-β-сплавы												
BT15	2,5-3,5	-	-	6,5-7,5	5,5-11,5	-	-	Листы	Закладка	85000	880-1020	12-25
ТС6	3	-	6	5	11	-	-	»	Закладка и старение	115000	1400-1500	4
β-сплавы												
4201	-	-	-	33	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 31

Химический состав титановых литейных сплавов, % по массе

Марка сплава	Ti	Al	Mo	Cr	Fe	Si	V	Zr	C	Fe	Si	Zr	w	O ₂	N ₂	H ₂	Сумма прим.	
																		Не более
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
BT5Л	Ос-нов.	4,1...6,2	-	-	-	-	-	-	0,20	0,35	0,20	0,80	0,20	0,20	0,05	0,015	0,30	
BT31Л	»	5,3...7,0	20...3,0	0,8...2,3	0,2...0,7	0,15...0,4	-	-	0,15	-	-	0,50	0,20	0,18	0,05	0,015	0,30	
BT6Л	»	5,0...6,5	-	-	-	-	3,5...4,5	-	0,1	0,3	0,15	0,3	0,20	0,15	0,05	0,015	0,30	
BT9Л	»	5,6...7,0	2,8...3,8	-	-	-	-	0,8...2,0	0,15	0,3	-	-	0,20	-	0,15	0,05	0,015	0,30
BT14Л	»	4,3...6,3	2,5...3,8	-	-	-	0,9...1,9	-	0,12	0,6	0,15	0,3	0,20	0,15	0,005	0,015	0,30	
BT20Л	»	5,5...7,5	0,5...2,0	-	-	-	0,8...1,5	4,0...6,0	0,12	0,5	0,2	-	0,20	0,15	0,05	0,015	0,30	
BT21Л	»	5,8...7,2	0,4...1,0	0,2...0,5	-	-	0,8...1,5	4,0...6,0	0,12	0,5	0,2	-	0,20	3,15	0,05	0,015	0,30	

Таблица 32

Механические свойства титановых литейных сплавов системы при комнатной температуре

Марка сплава	Вид полуфабриката	Состояние	E	$\sigma_{\text{тц}}$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{\text{в}}$	δ_{10}	ψ	KCU ,	НВ
			кгс / мм ²				%		кгс/мм ²	Ø отпечатка, мм
BT5Л~	Литье	Без термообработки	11800	55	68	78	6	14	3,0	-
BT31Л	»	То же	11400	63	83	100	5	10	3,0	3,3...3,5
BT6Л	»	»	11500	65	83	95	8	15	4,5	320...360*
BT9Л	»	»	11300	69	85	100	8	22	3,5	-
BT14Л	»	Отожженное	11300	65	35	95	7	15	3,5	-
BT20Л	»	Без термообработки	10800	65	85	95	5	20	4,0	-
BT21Л	»	То же	11200	65	88	105	6	12	2,0	3,4...3,5

Таблица 33

Физические свойства титановых литейных сплавов

Марка сплава	Плотность, кг/м ³	Коэффициент термического линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, 1/град, при температурах, °С												Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·град), при температурах, °С						Удельная теплоемкость C , кДж/(кг·град), при температурах, °С						$\rho \cdot 10^6$, Ом·см, 20°С	
		20-100	20-200	20-300	20-400	20-500	20-600	20-100	20-200	20-300	20-400	20-500	20-600	25	100	200	300	400	500	600							
BT5Л	4410	8,6	8,8	8,9	9,1	9,2	9,3	9,1	9,2	9,7	9,8	9,9	9,9	8,79	9,63	10,9	11,7	13,0	14,2	15,5	0,544	0,586	0,628	0,670	0,712	0,754	132
BT31Л	4430	9,5	9,7	9,9	10,1	10,3	-	9,9	10,2	10,7	11,1	-	6,69	7,54	9,21	10,4	12,1	13,4	15,1	0,565	0,607	0,646	0,691	0,754	0,795	86,5	
BT6Л	4430	8,3	8,7	8,9	9,9	9,5	9,8	8,9	9,4	10,0	10,6	11,2	8,8	9,6	11,0	11,5	11,4	15,0	16,3	0,543	0,585	0,623	0,668	0,710	0,752	162	
BT9Л	4490	7,6	7,6	8,2	9,05	9,57	9,8	7,6	10,0	10,7	10,5	10,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	169	
BT14Л	4500	7,8	8,1	8,4	8,7	8,7	8,9	8,25	8,9	9,57	10,8	11,45	-	9,1	10,6	11,4	13,1	13,7	15,3	0,501	0,542	0,581	0,623	0,667	0,71	161	
BT20Л	4470	8,7	8,8	8,9	9,0	9,1	9,2	9,0	9,0	9,2	9,6	9,7	-	8,37	9,63	10,4	12,1	13,8	15,1	0,586	0,628	0,668	0,712	0,754	0,795	168	
BT21Л	4470	8,5	8,7	9,0	9,2	9,5	9,7	9,0	9,5	10,0	10,5	10,6	-	7,9	9,6	10,8	12,1	13,4	15,0	0,515	0,570	0,625	0,675	0,73	0,78	170	

Таблица 34

Технология литья титановых литейных сплавов

Марка сплава	Метод выплавки	Способ литья	Температурный интервал кристаллизации, °С	Температура литья, °С	Условия охлаждения	Жидкотекучесть (по длине прутка), мм	Линейная усадка, %
BT5Л	Вакуумная дуговая гарниссажная с расходуемым электродом	Центробежный	1640...1600	1850...2000	В вакууме	560	1...1,2
BT31Л	То же	»	1620...1560	0850...2000	В вакууме или нейтральной среде	460	0,8...1,15
BT6Л	»	»	1650...1590	1850...2000	В вакууме	510	1,1
BT9Л	»	»	1620...1560	1850...2000	В вакууме	515	1,1
BT14Л	»	»	1650...1590	1850...2000	В вакууме или нейтральной среде инертных газов	520	1,0
BT20Л	»	»	1620...1560	1800...2000	В вакууме	480	1,05
BT21Л	»	»	1630...1550	1850...2000	В вакууме или нейтральной среде	480	1,0

Таблица 35

Рекомендуемая термическая обработка титановых литейных сплавов

Марка сплава	Вид термообработки	Температура нагрева, °С	Выдержка, ч	Охлаждающая среда
BT31Л	Отжиг	650	1,2	На воздухе
BT14Л	»	750-760	0,5...1,0	*
BT21Л	*	850	1...2	На воздухе или в нейтральной среде

Таблица 36

Некоторые технологические и физические характеристики

Марка сплава	Свариваемость		Обрабатываемость резанием	Коррозионная стойкость	Примечание
	Свариваемые материалы	Метод сварки			
BT5Л	BT5Л+BT5Л	ААрдЭС	Удовлетворительная	Устойчив в атмосферных условиях и морской воде	Силовые детали сложной формы, длительно работающие до 400°С (2000 ч)
BT3-1Л	-	-	То же	То же	Детали, длительно работающие до 400°С
BT6Л	-	-	»	*	Детали, длительно работающие до 400°С
BT9Л	BT9Л+BT9Л	РАрдЭС АЛрдЭС	»	»	Детали, длительно работающие до 500°С и 100 ч при 550°С
BT14Л	BT14Л+BT14Л	ААрдЭС	»	»	Детали разового действия, работающие до 400°С
BT20Л	BT20Л+BT20Л	»	*	»	Детали, длительно работающие до 350-500°С
BT21Л	BT21Л+BT21Л	»	»	»	Сварные детали, работающие при температуре до 400°С 100 мин и 500°С 5 мин

1.4. Никелевые жаропрочные сплавы

Никелевые литейные жаропрочные сплавы имеют более высокие пределы длительной прочности по сравнению с деформируемыми сплавами. Указанное объясняется дендритной структурой и возможностью образования различных фаз (карбидных, боридных и др.) по границам зерен в виде псевдоэвтектики, затрудняющих развитие трещин по этим границам. Значительное легирование деформируемых сплавов ограничено необходимостью горячей пластической деформации, в то время как литейные сплавы имеют большие возможности. Поэтому температурный уровень жаропрочности литейных сплавов на 50...100°C выше деформируемых. Кроме того, литейные сплавы обладают большой технологичностью, особенно при изготовлении деталей сложной формы. Одним из недостатков рассматриваемых сплавов является более низкая ударная вязкость по сравнению с деформируемыми.

По способу структурного упрочнения никелевые литейные сплавы можно разделить на две группы:

- сплавы с карбидным упрочнением. Основными упрочняющими фазами являются карбиды типа $Ni_3(Mo, Cr)_3C$, карбонитриды;
- сплавы с интерметаллидным упрочнением.

Высокие характеристики жаропрочности достигаются образованием в них упрочняющей α -фазы (γ -фазы) типа $Ni_3(Al, Ti)$, ее количеством, степенью дисперсности, распределением и формой выделений. Твердый раствор в этих сплавах легирован Co, Cr, W, Mo, Nb. В малоуглеродистых никелевых сплавах, легированных ниобием, образуется упрочняющая метастабильная фаза Ni_3Nb со структурой, подобной твердому раствору, как и фаза $Ni_3(Al, Ti)$.

Сплавы первой группы неперспективны в смысле повышения характеристик жаропрочности. Сплавы второй группы являются в настоящее время основными среди жаропрочных никелевых сплавов.

Ниже приведены свойства сплавов вакуумной индукционной выплавки, предназначенных для последующего переплава в вакуумных индукционных печах при литье лопаток и других фасонных отливок (табл. 37 – 40).

Химический состав никелевых жаропрочных литейных сплавов

Марка сплава	Массовая доля элементов, %														Прочие элементы						
	C	Cr	Ni	Mo	W	Al	Ti	Nb	Co	Ce	Zr	B	Si	C		P	S	Mn	Pb	Вн	Fb
ЖСЗ-ВИ	0,11...0,16	14,0...18,0	0,0	3,0...4,5	4,5...8,0	1,6...2,2	1,6...2,3	-	-	-	-	0,005	0,0	0,003	0,015	не более	0,6	-	-	8,0	Ванадий <0,3
ЖСЗДК-ВИ	0,06...0,11	11,0...12,5	нова	3,8...4,5	3,8...4,5	4,0...4,8	2,5...3,2	-	8,0...10,0	0,02	-	0,02	0,4	0,01	0,015	-	0,4	-	-	2,0	-
ЖСВК-ВИ	0,13...0,20	9,5...5,2	-/-	3,5...4,5	4,5...6,5	5,0...6,0	2,5...3,2	-	4,0...5,5	0,025	0,04	0,02	0,4	0,015	0,015	-	0,4	0,001	0,0005	2,0	-
ЖС16-ВИ	0,08...0,14	4,6...5,2	-/-	-	15,3...16,5	5,6...6,2	0,7...1,2	1,6...2,1	6,0...9,0	0,02	0,2	0,02	0,2	0,015	0,015	-	0,4	0,001	0,0005	1,0	Лантан <0,02 Гафний <0,7...1,2
ЖСВУ-ВИ	0,13...0,20	8,0...9,5	-/-	1,2...2,4	9,5...11,0	5,1...6,0	2,0...2,9	0,8...1,2	9,0...10,5	0,02	0,04	0,035	0,4	0,010	0,015	0,001	0,4	0,001	0,0005	1,0	Лантан <0,005
ЖС30-ВИ	0,11...0,2	5,0...9,0	-/-	0,4...1,0	10,5...12,5	4,8...5,8	1,4...2,3	0,4...1,4	7,5...9,5	0,015	0,05	0,02	0,4	0,010	0,015	0,03	0,4	-	-	1,0	Лантан <0,005 Гафний <0,3...1,2
ВЖЛ1-ВИ	0,10...0,17	15,0...17,0	-/-	3,5...5,0	2,0...2,5	2,0...2,8	2,0...3,0	-	-	-	-	0,08	1,2	0,02	0,02	-	0,3	-	-	6,0...7,5	-
ВЖЛ2-ВИ	0,11...0,17	12,0...15,0	-/-	12,0...15,0	8,0...10,0	1,5...3,0	2,0...3,2	-	-	-	-	0,13	1,0	0,02	0,02	-	-	-	-	2,0...3,5	-
ВЖЛ12У-ВИ	0,14...0,20	8,5...10,5	-/-	2,7...3,4	1,0...1,8	5,0...5,7	4,2...4,7	0,5...1,0	12...15,0	0,02	0,02	0,015	0,4	0,015	0,015	-	0,4	0,001	0,0005	2,0	Ванадий 0,5...1,0 Ванадий 0,5...1,0
ВЖЛ12З-ВИ	0,12...0,20	8,5...10,0	-/-	2,7...3,4	1,0...1,8	5,0...5,7	4,2...4,7	0,5...1,0	8,0...10,0	0,015	0,02	0,015	0,4	0,015	0,015	-	0,4	0,001	0,0005	2,0	Ванадий 0,5...1,0 Лантан <0,01
ВЖЛ14Н-ВИ	0,03...0,08	18,0...20,0	-/-	4,0...5,0	-	1,2...1,5	2,5...2,9	1,6...2,8	-	0,025	-	0,005	0,4	0,015	0,015	-	0,4	-	-	8,0...10,0	-
ВЖЛ18-ВИ	0,10...0,15	17,0...18,0	-/-	4,5...6,0	2,5...4,0	3,4...4,0	2,2...3,0	1,2...1,8	4,0...6,0	0,02	0,02	0,06	0,4	0,015	0,015	-	0,4	0,001	0,0005	1,0	-
ВЖЛР-ВИ	0,03...0,10	32,0...35,0	-/-	2,3...3,5	4,3...5,5	0,7...1,3	0,7...1,3	0,7...1,3	-	0,03	-	0,008	0,3	0,010	-	-	0,04	-	-	0,5	Кальций не более 0,02
ВЖЛ-ВИ	0,02...0,10	30,0...35,0	-/-	2,9...3,5	4,7...5,3	1,0...1,3	0,7...1,3	0,7...1,3	0,2...0,8	-	-	0,005	0,4	0,01	0,015	0,04	0,5	-	-	6,0	-/-

Механические свойства никелевых жаропрочных литейных сплавов

Марка сплава	Режим термической обработки контрольных образцов	Механические свойства при комнатной температуре, не менее			При испытании на длительную прочность		
		$\sigma_{\text{в}}$, кгс/мм ²	δ , %	KCU, кгс·м/см ²	температура испытания, °С	постоянно приложенное напряжение, кгс/мм ²	время до разрушения, ч
ЖСЗ-ВИ	Нагрев 7ч при 1150±10°С, охлаждение на воздухе	-	-	-	800	25	40
ЖСЗДК-ВИ	Нагрев до 1210±15°С, выдержка 3-4 ч, охлаждение на воздухе	95	7	3	850	35	50
ЖС6К-ВИ	Нагрев до 1210±15°С, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе	-	-	-	975	20	50
ЖС6У-ВИ	Нагрев до 1210±10°С, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе	85	3	-	975	23	40
ЖС16-ВИ	Без термообработки	85	4	-	975	24	40
ЖС30-ВИ	Без термообработки	85	3	2	975	24	40
ВЖЛ1-ВИ	-/-	68	-	-	-	-	-
ВЖЛ12У-ВИ	Без термообработки или по режиму: нагрев до 1210±10°С, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе	85	5	-	975	20	40
ВЖЛ12Э-ВИ	Без термообработки или по режиму: нагрев до 1210±10°С, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе	85	5	-	975	20	40
ВЖЛ14Н-ВИ	Нагрев до 1210±10°С, выдержка 3 ч, охлаждение на воздухе Старение при 700±10°С, 16 ч, охлаждение на воздухе	85	9	4	600	60	10
ВХЛ-ВИ	Закалка с 1160+10Х, выдержка 3 ч, охлаждение на воздухе Старение при 950±10°С, 2 ч, охлаждение на воздухе	80	5	-	800	18	100
ВЖЛ18-ВИ	Нагрев до 1180±10°С, выдержка 3,5 ч, охлаждение на воздухе. Старение при 950±10°С, выдержка 3,5...4 ч, охлаждение на воздухе	90	2	-	900	24	40

Таблица 39

Физические свойства никелевых литейных жаропрочных сплавов.

Марка сплава	Плотность, кг/м ³	Коэффициент термического линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, 1/град, в интервале температур, °С								Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м • град), при температуре, °С								
		20...100	20...300	20...500	20...700	20...800	20...900	20...1000	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
ЖСЗ	8200	11,3	12,2	12,9	13,9	14,6	15,4	16,4	9,7	10,5	11,7	13,4	15,6	17,2	18,9	21,0	21,8	27,0
АНВ300	8050	10,9	12,5	14,3	16,0	16,8	17,7	-	9,2	10,1	11,2	13,0	14,7	16,4	18,0	19,7	21,8	23,5
ЖС6	8200	12,1	13,0	13,8	14,7	15,2	16,0	17,2	10,5	11,2	12,6	13,9	15,5	17,6	19,7	21,8	24,0	27,0
ЖС6К	8100	10,8	12,1	13,5	14,2	14,7	15,2	15,9	8,4	8,7	11,7	13,4	15,5	19,1	19,7	21,4	23,1	25,2
ВЖЛ8	8040	13,1	14,0	14,9	15,4	16,0	16,9	18,0	10,1	11,2	13,0	14,3	16,0	17,6	19,3	20,6	22,3	24,4

Примечание. Жаростойкость никелевых литейных жаропрочных сплавов (температура, до которой жаростоек сплав, °С) ЖСЗ-100, ЖС6-1050, ЖС6-К-1150, ВЖЛ-1000.

Таблица 40

Технологические данные и применение никелевых литейных жаропрочных сплавов

Марка сплава	Метод выплавки	Способ литья	Температура заливки в вакууме, °С	Линейная усадка, %	Термическая обработка	Применение
ЖСЗ	Высокочастотные открытые или вакуумные печи	По выплавляемым деталям	1550...1650	2,1...2,3	Закалка с 1150°С (7 ч) на воздухе	Сопловые лопатки газовых турбин, работающие до 900°С
АНВ300	Высокочастотные открытые или вакуумные печи	По выплавляемым деталям	1620	2,0...2,5	Закалка с 1120°С (10 ч) на воздухе	Сопловые лопатки газовых турбин, работающие до 900°С
ЖС6	То же	То же	1500...1600	2,0...2,5	Закалка с 1200±20°С (4 ч) на воздухе	Сопловые и рабочие лопатки газовых турбин, работающие до 800-1000°С; охлаждаемые лопатки, работающие при температуре газа у поверхности до 1200°С
ЖС6К	-//-	-//-	1500...1600	2,0...2,5	Закалка с 1200...1220°С (3-4 ч) на воздухе	То же
ВЖЛ8	-//-	-//-	1500-1540	0,55	1-я закалка с 1150°С (4ч) на воздухе, 2-я закалка с 1080°С(4ч) на воздухе	Сопловые и рабочие лопатки газовых турбин, цельнолитые роторы и другие детали, работающие до 900°С

1.5. Стали

Огромное количество литейных и деформируемых марок сталей затрудняет их классификацию и носит условный характер. Обычно стали классифицируют по структуре, химическому составу, назначению и способу выплавки. В соответствии с государственным стандартом все остальные отливки разделяются на две группы (по маркам сталей):

- отливки из конструкционной нелегированной и легированной стали;

- отливки из высоколегированной стали со специальными свойствами.

1-я группа отливок изготавливается из стали марок: 15Л, 20Л, 25Л, 30Л, 35Л, 40Л, 45Л, 30Л, 55Л, 20ГЛ, 35ГЛ, 30ГСЛ, 20Г1ФЛ, 20ФЛ, 30ХГСФЛ, 45ФЛ, 32Х06Л, 40ХЛ, 35ХМЛ, 30ХНМЛ, 35ХГСЛ, 35НГМЛ, 20ДХЛ, 20ХГСНДМЛ, 08ГДНФТЛ, 13ХНДФТЛ, 12ДН2ФЛ, 12ДХН1МФЛ, 23ХГС2МФЛ, 25Х2Г2ФЛ.

2-я группа отливок изготавливается из сталей следующих марок:

- *мартенситный класс* -

20Х5МЛ, 20Х5ТЛ, 20Х8ВЛ, 20Х13Л, 10Х14НДЛ, 09Х16Н4БЛ, 09Х17Н3СЛ - коррозионно-стойкие;

40Х9С2Л - жаростойкая;

20Х12ВНМФЛ - жаропрочная;

10Х12НДЛ - кавитационно-стойкая;

- *мартенситно-ферритный класс* -

15Х13Л - коррозионно-стойкая;

- *ферритный класс* - 15Х25ТЛ - коррозионно-стойкая;

- *аустенитно-мартенситный класс* -

08Х14Н7МЛ, 14Х18Н4Г4Л - коррозионно-стойкие;

- *аустенитно-ферритный класс* -

15Х25Н5ТМФЛ, 16Х18Н12С4ТЮЛ - коррозионно-стойкие;

35Х23Н7СЛ, 40Х24Н12СЛ, 20Х20Н14С2Л - жаростойкие;

10Х18Н3Г3Д2Л - кавитационно-стойкая;

- аустенитный класс -

07X18H9Л, 10X18H9Л, 12X18H9ТЛ, 10X18H11БЛ, 2X18H12МЗТЛ, 10X17H10Г4МБЛ - коррозионно-стойкие;

55X18П4С2ТЛ, 15X23H18Л, 20X25H19С2Л, 18X25Ш9СЛ, 45X17Г13H3ЮЛ - жаростойкие;

35X18H24С2Л, 31X19H9МВБТЛ, 20X21H46В8Л, 12X18H12БЛ, 08X17H34В5Т3Ю2Л, 15X18H22В6М2Л - жаропрочные;

110Г13Л, 120ПЗХ2БЛ, 130Г14ХМФАЛ - износостойкие.

Здесь рассмотрены только некоторые марки литейных сталей. При этом основное внимание уделено характеристикам сталей ответственного авиационного значения. Как было указано выше, в соответствии с действующими стандартами все рассмотренные стали разделены на две группы: 1-я - конструкционные нелегированные и легированные и 2-я - высоколегированные со специальными свойствами. Состав и свойства конструкционной нелегированной и легированной стали для отливок приведены в табл. 41-46.

Таблица 41

Химический состав конструкционной нелегированной и легированной сталей для отливок, % по массе

Марка стали	с	Si	Mn	S		Cr	Ni	Si	Другие элементы
				не более					
15Л	0,12...0,20	0,17...0,37	0,35...0,65	В зависимости от группы отливок и футеровки печи (см. табл. 42)		Не более 0,3	Не более 0,3	Не более	-
25Л	0,22...0,3	0,17...0,37	0,05...0,8			-/-	-/-	-/-	-
40Л	0,37...0,45	0,17...0,37	0,5...0,8			-/-	-/-	-/-	-
55Л	0,52...0,6	0,17...0,37	0,5...0,8			-/-	-/-	-/-	-
27ГЛ	0,22...0,32	0,17...0,37	1,1...1,5	0,05	0,05	-	-	-	-
40ХЛ	0,35...0,45	0,17...0,37	0,5...0,8	0,04	0,04	0,8...1,1	0,4	0,3	-
20ГСЛ	0,16...0,22	0,6...0,8	1,0...1,3	0,03	0,03	0,3	0,4	0,3	-
35ХМЛ	0,3...0,4	0,17...0,37	0,5...0,8	0,04	0,04	0,8...1,1	0,3	0,3	0,2...0,3 Mo
16ХГТЛ	0,13...0,18	0,17...0,37	1,0...1,3	0,035	0,035	1,5...1,8	0,5	-	0,06...0,12Ti
30ХНМЛ	0,28...0,35	0,17...0,37	0,5...0,8	0,04	0,04	1Д...1,6	1,3...1,6	<0,3	0,2...0,3 Mo
27ХСНЛ	0,24...0,3	0,5...0,8	0,9...1,2	0,035	0,035	0,7...1,0	1,4...1,8	-	-
30ДХСНЛ	0,25...0,35	0,7...1,1	0,25...0,5	0,03	0,03	0,7...1,0	1,3...1,6	1,3...1,6	-
30ХГСЛ	0,32...0,4	0,6...0,9	0,9...1,2	0,035	0,035	0,7...1,0	<0,4	-	0,1...0,2 V или Mo
ВКЛЗ	0,09...0,16	0,2...0,6	0,3...0,7	0,03	0,03	1,9...2,4	0,8...1,2	-	1,0...1,4 W 0,2...0,3 Mo

Таблица 42

Содержание примесей в углеродистых сталях, % не более

Группа отливок	Сера		Фосфор	
	в основной* печи	в кислой* печи	в основной печи	в кислой печи
I	0,5	0,06	0,05	0,06
II	0,045	0,06	0,04	0,06
III	0,045	0,05	0,04	0,05

Примечание. Группы отливок: I - отливки общего назначения; II - отливки ответственного назначения; III - отливки особого ответственного назначения; *- футеровка печи.

Таблица 43

Механические свойства при комнатной температуре конструкционной нелегированной и легированной сталей для отливок

Марка стали	Температура термообработки, °С		$\sigma_{0,2}$	σ_s	δ_5	ψ	KCU, кгс/мм ²
	Нормализация или закалка	Отпуск					
15Л	Нормализация или отжиг		20	40	24	35	5,0
25Л	-//-		24	45	19	30	4,0
40Л	-//-		30	53	14	25	3,0
55Л	-//-		35	60	10	18	2,5
Нормализация и отпуск							
20ГСП	870...890	570...600	30	55	18	30	3,0
35ХМЛ	860...880	600...650	40	60	12	20	3,0
30ХНМЛ	860...880	600...650	35	70	12	20	3,0
30ДХСНЛ	860...870	600...650	60	80	10	20	3,0
35ХГСЛ	890	600	92	105	10	25	2,5
Закалка и отпуск							
27ГЛ	860...870	560...600	45	65	10	20	5,0
40ХЛ	850...860	600...650	50	65	12	25	3,5
16ХГТЛ	890...910	150...170	60	90	7	20	3,0
30ХНМЛ	860...870	600...650	65	80	10	20	4,5
30ДХСНЛ	860...870	600...650	70	90	10	10	4,0
27ХГСНЛ	880...900	540...560	75	90	10	30	4,0
ВКЛЗ	900	550	85...100	95...125	8...15	30...50	4,5,9,0

Примечания: 1. Температура нормализации или отжига для углеродистых сталей принимается на 30...50°С выше A_{c3} .

2. Механические свойства после окончательной термообработки испытываются на образцах, отлитых по выплавляемым моделям, или отдельно отлитых образцах.

Таблица 44
Физические свойства конструкционной нелегированной и легированной сталей
для отливок

Марка стали	Плотность, кг/м ³	Коэффициент термического линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, 1/град, при температурах, °С						Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м · град), при температурах, °С					Удельная теплоемкость C , кДж/(кг · град), при температурах, °С			
		20...100	20...200	20...300	20...400	20...500	20...600	20	100	200	400	500	0...100	0...200	0...400	0...600
15П-55Л	7860...7820	11,1	12,1	12,8	13,4	13,9	14,5	-	77,7...	66,78...	47,5...	41,2...	0,47	0,48	0,52	0,57
27ХГСНЛ	7780	11,0	-	13,0	-	-	14,5	41,1	68,04	55,4	35,7	31,5	-	-	-	-
35ХГСЛ	7800	11,0	-	13,0	-	-	14,5	35,7	-	-	-	31,5	-	-	-	-
ВКЛЗ	7800	10,7	11,8	12,5	12,9	13,4	13,8	-	29,8	30,2	31,1	-	-	-	-	-

Примечание. Для большинства конструкционных легированных сталей плотность равна 7800, коэффициент теплопроводности при 20°С (33,6...39,3) Вт/(м · град).

Таблица 45
Некоторые технологические свойства и применение конструкционной нелегированной и легированной сталей для отливок

Марка	Линейная	Жидкотекучесть по длине прутка при температуре, °С		Примечание		
		1550	1650			
15Л	1,8...2,2	200	Хорошая	Детали, подвергающиеся ударным нагрузкам, резким изменениям температуры и работающие до 400°С Обычные детали и машины Детали, подвергающиеся износу, и детали с небольшой толщиной стенок и упрочняемые термообработкой в приборостроении (детали приборов, аппаратов и др.), судостроении (ахтерштевни, якоря, винты), машиностроении, для металлургического оборудования		
35Л	1,8...2,2	350				
40Л						
55Л	-					
40ХЛ	-	340				
30ХНМЛ	-	340				
30ДХСНЛ	-	300				
35ХМЛ	-	250				
27ХГСНЛ		190				
35ХГСЛ	2,0	Хорошая			Хорошая	
ВКЛЗ	2,0	Удовлетвор.			Удовлетвор.	Цементируемые детали повышенной прочности
16ХГТЛ	2,0	-/-				

**Некоторые технологические параметры выплавки, литья
и термической обработки сталей для отливок**

Марка стали	Метод выплавки	Способ литья	Температура заливки форм, °С	Рекомендуемая термическая обработка
16ХГТЛ	Индукционные печи с основной футеровкой	По выплавляемым моделям и в керамические формы		Нормализация с 900°С; закалка с 860°С в масле, отпуск при 160°С
27ХГСНЛ	То же	То же	1500...1850	Закалка с 890±10°С и отпуск при 200... 240°С
35ХГСЛ	-//-	-//-	1500...1570	Предварительная: отжиг при 890...900°С 2...3 ч или нормализация с отпуском; окончательная: закалка с 880...900°С в масле, отпуск при 570...670°С 2...3 ч
ВКЛЗ	-//-	-//-	1620...1640	Предварительная: отжиг при 900°С; окончательная: закалка с 900°С в масле и отпуск при 550°С

***Высоколегированные стали со специальными свойствами
для отливок***

В данном разделе приводятся в основном данные по литейным, коррозионно-стойким сталям, применяемым в конструкциях самолетов, двигателей и других изделиях. Корпуса, крыльчатки и др., работающие при температуре 196°С, изготавливают из сталей переходного аустенитно-мартенситного класса ВНЛ1 и ВНЛ6. Сталь мартенситного класса ВНЛ3 и переходного аустенитно-мартенситного класса ВНЛ2 применяют для изготовления деталей самолетов и вертолетов. Сталь ВНЛ4 аустенитно-ферритного класса предназначена для деталей, работающих в атмосферных условиях и некоторых агрессивных средах. Сталь ЭИ481Л применяется для изготовления силовых двигателей, корпусов, газовых турбин. Сталь ВЖЛ10 по жаропрочным свойствам превосходит большинство литейных сталей. Стали ЭИ481Л и ВЖЛ10 - аустенитного класса с карбидным и интерметаллидным упрочнением. Для изготовления фасонных отливок широко применяются стали полуферритного класса типа 1Х13Л, мартенситного класса Х17Н3СЛ, 2Х13Л, Х13Н3ВФЛ и аустенитного класса Х18Н9БЛ. Состав, свойства и применение высоколегированных сталей приведены в табл. 47-50.

Таблица 47
Химический состав высоколегированных сталей со специальными свойствами для отливок, % по массе

Марка стали	C	Cr	Ni	Nb	Mo	Cu	Si	Mn	V	Co	Mg	W	Ti	не более						
														Si	Mn	C	Ti	Al	S	P
X18H9БЛ	-	17...20	8...12	(8-9)С*	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-	1,0	2,0	0,1	-/-	0,025	0,025	
ВНЛ1	-	13...15	6...8,5	-/-	0,5...1	-	-	-	-	-	-	-/-	-/-	0,75	0,9	0,08	-/-	-/-	0,025	0,025
ВНЛ2	0,12...0,16	13...15	4,5...5,5	-/-	2,3...2,8	-/-	-	-	-	-	-	-/-	-/-	0,75	0,9	-/-	-/-	-/-	0,025	0,025
ВНЛ3	-/-	13...14,5	4,5...5,5	≤0,1	1,5...2	1,2...1,75	-	-	-	-	-	-/-	-/-	0,7	1,0	0,08	-/-	-/-	0,03	0,03
ЭИ288Л	0,05...0,1	15...18	2,8...3,8	-/-	-/-	-/-	0,8...1,5	0,3...0,8	-/-	-	-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	0,025	0,025
ВНЛ4	-/-	20,5...22,5	8...9	-/-	0,8...1,3	-/-	2...2,5	0,5...0,9	0,2...0,7	-	-	-/-	-/-	-/-	-/-	0,07	-/-	-/-	0,03	0,03
ВНЛ5	0,1...0,16	10,5...12,5	4,5...6,5	-/-	4...5	-/-	-/-	-/-	-/-	-	-	-/-	-/-	0,6	0,6	-/-	-/-	-/-	0,02	0,02
ВНЛ6	-/-	12,5...13,5	4,5...6	-/-	4...5	-/-	-/-	-/-	-/-	8...9	0,001...0,005	-/-	-/-	0,5	0,7	0,04	-/-	-/-	0,02	0,02
ЭИ654Л	0,1...0,23	17...20	10...13	-/-	-/-	-/-	3,8...4,5	0,5...1,1	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	0,5	0,35	0,025	0,025
ЭИ481Л	0,34...0,4	11,5...13,5	7...9	0,25...0,45	1,1...1,4	-/-	0,3...0,8	7,5...9,5	1,25...1,55	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	0,03	0,03
ВЖЛ10	0,13...0,18	10...12	22...25	-/-	2...3	-/-	0,6	0,6	-/-	-/-	-/-	3,4	3,2	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	0,01	0,02
1Х13Л	-/-	12...14	0,6	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	0,7	0,6	0,15	-/-	-/-	0,03	0,03
Х13Н3ВФЛ	0,09...0,15	11,5...13,5	2,3...3	-/-	-/-	-/-	0,2...0,8	0,2...0,8	0,18...0,28	-/-	-/-	1,6...2,2	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	0,03	0,03
Х17Н3СЛ	0,05...0,12	15...18	2,8...3,8	-/-	-/-	-/-	0,8...1,5	0,3...0,8	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	0,07	-/-	-/-	0,03	0,03
Х24Н8М2Д3Л (ВКЛ1)	-/-	23...25	8...9	-/-	1,75...2,25	2,75...3,25	0,4...0,8	0,3...0,8	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	0,025	0,025

* - содержание углерода

Таблица 48

Механические свойства при комнатной температуре высоколегированных сталей со специальными свойствами отливок

Марка стали	Состояние полуфабриката	E	σ_e	$\sigma_{0,2}$	δ_5 (δ_{10})	ψ	НВ, $D_{500\text{мм}}$ мм	КСУ, кгс-м / см ²
		кгс / мм ²			%			
X18H9БЛ	Закаленные с 1100...1150°C в воде	-	45	20	25	35	5,3...4,8	5
ВНЛ1	Закалка с 1110°C на воздухе, обработка холодом при - 70°C, выдержка 2ч, отпуск при 250...350°C 2ч, отпуск при 250...350°C 1ч, охлаждение на воздухе	-	110	80	15	40	3,2...3,5	5
ВНЛ3	Гомогенизация при 1110+10°C, охлаждение на воздухе; закалка с 970+10°C на воздухе; старение при 460+10°C, 1ч, охлаждение на воздухе	18500	130	95	15	40	2,9...3,2	8
ВНЛ2	Закалка с 1110°C на воздухе, обработка холодом при - 70°C, выдержка 2ч, отпуск при 450°C 2ч, охлаждение на воздухе		135	90	10	30	2,9...3,1	4 1
ЭИ268Л	Закалка с 1050°C в масле, отпуск при 550°C 3ч, охлаждение на воздухе	-	110	90...97	8...19	33...51	3,4	2 1
X13H3ВФЛ	Закалка с 1050°C в масле или на воздухе, отпуск при 680...720°C	-	90	75	9	30	3,8...3,45	2 1
X17H3СЛ	Закалка с 1050°C в масле, отпуск при 540, 560°C		95	75	8	20	3,8...3,2	2,5
X24H8M2ДЗГЛ (ВКЛ1)	Закаленный с 1100+20°C в воде	18000	65	40	(18)	50	4.1	12
ВНЛ5	Гомогенизация при 1130°C, охлаждение на воздухе, закалка с 1130°C 3ч, охлаждение на воздухе, обработка холодом при - 70°C 2ч, отпуск при 500°C 2ч, охлаждение на воздухе	18000	150	120	12	30	2,75...3,05	4
ВНЛ4	Закалка с 1110°C, охлаждение в воде, старение при 500°C 8ч, охлаждение на воздухе	19000	60...72	40..42	(30...35)	40...58	4.5...4,0	10..15
ВНЛ6	Закалка с 1130+10°C на воздухе, обработка холодом при - 70°C 2ч, отпуск при 480°C 3ч	18500	140	100	15	35	3.2...2,9	5
ЭИ654Л	Закаленный с 1100°C в воде	15500	68	32	(36)	34		4
ЭИ46Ш	Закалка с 1140+10°C в воде, старение при 780...820°C 10-14 ч, охлаждение на воздухе	-	85	55	8	8	3,5...3,8	
ВЖЛ10	Закалка с 1120°C в масле, двойное старение: 1-е при 740°C 16ч, охлаждение на воздухе; 2-е при 630°C 16ч, охлаждение на воздухе	-	85...95	60...67	10..14	12...18		2.5
1X13Л	Отжиг при 950°C, закалка с 1060°C в воде, отпуск при 750°C	-	56	40	20	50	- -	8

Примечание. Вид полуфабрикатов при испытании механических свойств для сталей марок X18H9БЛ, ВНЛ1, ВНЛ2, ВНЛ3, ВНЛ4, ВНЛ5, ВНЛ6, ЭИ654Л, ВКЛ1 - отливки, полученные литьем по выплавляемым моделям, и в керамические формы; для сталей марок Э481Л и ВЖ-10Л – в песчаные формы; для сталей марок 1X13Л, X13H3ВФЛ, X17H3СЛ - по выплавляемым моделям.

Физические свойства высоколегированных сталей со специальными свойствами для отливок

Марка стали	Плотность, кг/м ³	Коэффициент термического линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, 1/град, при температуре, °С												Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м град), при температуре, °С									
		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	25	100	200	300	400	500	600	700	800
X18Н9БП	7850	16,5	16,9	17,1	17,4	17,6	17,7	17,7	17,7	18,1	18,3	18,6	19,0	17	-	-	-	-	22,2	23,9	25,1	-	-
ВНЛ1	7800	12,5	12,7	13,4	14,0	14,5	-	132	14,9	15,8	16,3	-	-	18	18,8	20,5	22,2	23,9	25,1	27,6	29,3	-	-
ВНЛ3	7800	11,2	11,8	12,3	12,6	13,0	13,3	12,4	13,2	13,8	14,6	14,5	-	16	17,2	18,4	20,1	21,3	22,6	24,3	25,5	-	-
ВНЛ3	7800	10,6	10,9	11,2	11,8	11,9	-	11,2	11,9	12,5	13,1	-	-	18	18,4	19,7	20,5	21,8	23,4	25,1	26,4	-	-
ЭИ268П	7800	10,3	10,7	11,1	11,35	11,7	-	11,2	11,7	12,2	12,9	-	-	18,0	19,6	21,4	22,6	24,7	26,4	27,6	28,4	29,7	-
ВНЛ4	7700	13,6	14,1	14,4	14,7	15,0	-	14,4	15,0	15,5	16,3	17,1	-	13,4	14,6	15,9	17,2	18,8	20,9	-	-	-	-
В1-Ш5	7680	10,5	10,5	10,8	11,1	11,4	-	10,8	11,4	12,0	12,4	-	-	-	17,16	18,84	20,83	22,19	23,44	25,12	25,95	28,05	-
ВНЛ6	7980	11,5	11,9	12,2	12,4	12,6	-	12,2	12,9	13,1	13,3	-	-	15,9	17,2	19,3	20,9	22,2	23,4	24,7	26,0	-	-
ЭИ654П	7670	16,3	16,4	17,1	17,7	18,3	18,75	16,5	18,5	19,6	20,4	21,2	21,0	10,0	11,3	13,0	14,2	15,9	17,2	18,8	20,5	23,0	-
ЭИ481П	7850	-	-	-	-	-	-	18,3	-	-	21,6	-	-	15,1	-	-	18,9	-	-	23,9	-	-	-
ВЖЛ10	8080	13,8	-	-	-	16,2	-	-	-	18,5	-	-	-	13,0	-	-	-	-	19,3	-	-	-	-
1Х13П	7740	11,0	-	-	-	12,0	-	11,6	12,4	12,9	13,5	13,8	14,1	-	25,1	26,0	26,8	28,1	28,9	-	-	-	-
Х13Н3ВФП	7800	11,6	12,0	12,4	12,8	-	-	12,5	13,3	14,0	-	-	-	19,7	-	22,3	-	24,8	-	26,9	-	-	-
Х17Н3СП	7800	-	11,0	-	-	-	-	-	13,6	15,1	-	-	-	19,7	-	21,4	-	24,8	-	27,7	-	-	-
Х24Н81М2Д3П (ВКП1)	7850	12,9	13,4	13,8	14,2	14,6	-	13,9	14,5	15,7	16,0	-	-	13,8	15,1	16,7	18,0	19,7	20,9	-	-	-	-

Таблица 50

Некоторые технологические данные и применение высоколегированных сталей
со специальными свойствами для отливок

Марка стали	Метод выплавки	Литейные свойства				Свариваемость	Коррозионная стойкость	Рекомендуемая термическая обработка	Примечание
		Жидкотекучесть (качественная характеристика)	Температура заливки, °С	Усадка, %					
				линейная	объемная				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X18H9БЛ	Индукционные печи с основной футеровкой	Хорошая	1530...1580	2	-	Дуговая и аргонно-дуговая	Высокая	Закалка с 1100-1150°С в воде	Детали трубопроводов, работающие при температурах до 800°С в условиях повышенной влажности
ВНЛ1	Открытые и вакуумные индукционные печи с основной футеровкой	-//-	1530...1580	2	-	Аргонно-дуговая сварка	Удовлетворительная	Закалка с 1100±10°С на воздухе, обработка холодом при -70°С 2ч, отпуск при 250-350°С 2ч, охлаждение на воздухе	Детали трубонасосных агрегатов (корпуса, крыльчатки и др.), работающие при комнатной температуре и низких температурах до -196°С
ВНЛ2	Индукционные печи с основной футеровкой	-//-	1520...1580	2	10	-//-	-//-	Предварительная нагрев до 780±10°С 6ч, охлаждение на воздухе. Окончательная с 1110+10°С на воздухе, обработка холодом при 70°С 2ч, старение при 450°С 2ч, охлаждение на воздухе	Высоконагруженные детали (корпуса, 1 крыльчатки, кронштейны и др.), работающие кратковременно до 500°С
ВНЛ3	Открытые и вакуумные индукционные печи с основной футеровкой	Хорошая	1540...1600	2	10	Дуговая и аргонно-дуговая	Удовлетворительная	Предварительная гомогенизация при 1110-10°С, охлаждение на воздухе. Окончательная закалка с 970+10°С на воздухе, старение при 460+10°С 1ч	Крупногабаритные литосварные конструкции и высоконагруженные детали, работающие при температурах до 350°С
ЭИ268Л	Индукционные печи с основной футеровкой	-//-	1520...1580	2,5	-	Сварка плавлением	-//-	Закалка с 1050+10°С, 3ч, охлаждение на воздухе, отпуск при 550+10°С 3ч, охлаждение на воздухе	Лопатки компрессора и другие фасонные отливки, работающие до 500°С

Продолжение табл. 50

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ВНЛ4	-//-	-//-	1520...1580	-	-	Дуговая и аргонно-дуговая	-//-	Закалка с 1110+10°C в воде, старение при 500°C 8ч, охлаждение на воздухе	Детали, работающие длительно до 300°C и кратковременно до 500°C
ВНЛ5	Открытые и вакуумные индукционные печи с основной футеровкой	-//-	1520...1580	2	10	-	-//-	Гомогенизация при 1130-10°C на воздухе, закалка с 1110+10°C на воздухе, обработка холодом при -70°C, отпуск при 480...520°C, охлаждение на воздухе	Детали, работающие кратковременно до 400°C во всех климатических условиях
ВНЛ6	Открытые и вакуумные индукционные печи с футеровкой	Хорошая	1530...1580	-	-	Аргонно-дуговая сварка	Удовлетворительная	Закалка с 1130+10°C на воздухе, обработка холодом при -70°C 2ч, старение при 480°C 3ч, охлаждение на воздухе	Силовые детали, турбонасосные агрегаты, работающие в интервале температур -196 до +500°C
ЭИ654Л	Индукционные печи с основной футеровкой	-//-	1540...1600	2,5...3	-	Все виды сварки	Высокая в агрессивных средах	Закалка с 1100°C в воде	Детали, работающие в агрессивных средах в интервале температур работы сред (несварные детали), работающие в атмосферных условиях
ЭИ481Л	Индукционные печи	-//-	1600...1620	2,0... 2,5	-	Контактная сварка	Удовлетворительная	Закалка 1140+10°C в воде или на воздухе, старение при 780...820°C 10-14ч, охлаждение на воздухе	Высокопрочные и жаропрочные детали
ВКЛ10	Вакуумные индукционные печи	-//-	1600 ... 1620	1,5	5,5	Электро-дуговая сварка	Хорошее сопротивление газовой коррозии	Закалка 1120°C в масле и двойное, старение при 740 и 630°C 16ч, охлаждение на воздухе	Сложные фасонные отливки, работающие до 800°C
1Х13Л	Открытые печи и ЭШП	Хорошая	-	2,5	-	Все виды сварки	Удовлетворительная	Предварительная: отжиг при 860±10°C. Окончательная закалка с 1030±10°C в масле, отпуск при 680.. 700°C	Детали, подвергающиеся ударным нагрузкам
Х13Н3ВФЛ	Индукционные печи	-//-	-	~2,5	-	-//-	Пониженная под напряжением	Закалка с 1050°C в масле или на воздухе, отпуск при 680...720°C	Турбинные и компрессорные лопатки, работающие до 550°C

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X17H3СЛ	Индукционные печи и ЭШП	-II-	-	-	-	Аргонно-дуговая сварка	Удовлетворительная	Закалка с 1050°С в масле, отпуск при 540...560°С	Турбинные и компрессорные лопатки, работающие в среде влажного воздуха до 500°С
X24H8M2 ДЗЛ (ВКЛ1)	Индукционные печи с основной футеровкой	-II-	1540... 1600	2,0		Дуговая и аргонно-дуговая сварка	Высокая во всеклиматических условиях и в ряде агрессивных сред; не склонна к межкристаллитной коррозии под напряжением	Закалка с 1100+20°С в воде	Детали, работающие в некоторых агрессивных средах при температурах сред, и детали, работающие в атмосферных условиях длительно до 300°С и кратковременно до 700°С и в морских условиях

Примечание. Детали из указанных марок сталей получают литьем по выплавляемым моделям или заливкой в керамические формы.

2. ПЕРЕПЛАВНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Для производства сплавов и сталей ответственного назначения требуются металлы высокой чистоты. Если раньше сплавы в основном выплавляли только в открытых печах, то в настоящее время ряд сплавов получают в вакууме или инертной среде. При этом расплавы перед заливкой необходимо фильтровать с целью их рафинирования.

Для повышения ресурса и надежности техники необходимо совершенствование технологии производства специальных сталей и сплавов с разработкой новых прогрессивных методов выплавки, направленных на повышение эффективности производства и улучшение качества продукции. В настоящее время получили дальнейшее развитие: вакуумная индукционная плавка (ВИП); вакуумный дуговой (ВДП), электрошлаковый (ЭШП), электронно-лучевой (ЭЛП) и плазменно-дуговой (ПДП) переплавы; вытяжка из расплава; ВДП полых слитков; прессование слитков из гранул; получение хлопьевидных чешуйчатых металлов и др.

Спецпереплаву подвергают слитки и заготовки, полученные обычными способами (конвертер, мартен, электропечь).

Вакуумный индукционный переплав (ВИП). По емкости существующие вакуумные индукционные печи условно разделяют на три группы:

- 1 - лабораторные печи с тиглем емкостью до 20-25 кг;
- 2 - полупромышленные печи емкостью 25-100 кг для выплавки небольших партий опытного металла и для получения отливок в вакууме;
- 3 - промышленные печи малой (0,15-1,0 т), средней (2-7 т) и большой (12-54 т) емкости.

По принципу действия вакуумные индукционные печи делятся на *периодические* и *полунепрерывные*.

В печах периодического действия операции по загрузке шихты в тигель, установке пустых и извлечению залитых форм и изложниц, зачистке и подготовке тигля к плавке производятся при открытой плавильной камере. В печах полунепрерывного действия все эти операции производятся без нарушения вакуума в плавильной камере печи, причем

печи этого типа в случае необходимости могут работать и в периодическом режиме.

Индукционные печи в зависимости от их емкости могут работать на сетевой, средней или высокой частоте. Обычно для лабораторных печей малой емкости используют частоту порядка 10000 Гц. Печи средней емкости работают на частоте около 4000 Гц и крупные печи в интервале 500-1000 Гц.

Выбор рабочей частоты генератора, геометрических параметров индуктора (диаметра, высоты), количества витков их сечения зависит от требуемой электрической мощности, а также от свойств и размеров переплавляемых материалов.

Легирующие и раскислители вводят через дозатор с откидными крышками. Дозатор представляет собой цилиндрическую камеру, в нижней части переходящую в конус. Дозатор, как и загрузочная камера, отделен от печной камеры технологическим вакуумным затвором. Секции дозатора снабжены откидными доньшками. В каждую секцию помещают необходимые материалы в той последовательности, в какой их вводят в расплав. После откачки дозатора открывают вакуумный затвор и поворотом рукоятки, установленной на крышке дозатора, доньшки секции освобождаются и откидываются, а присаживаемый материал через промежуточный лоток, находящийся в плавильной камере, попадает в тигель.

Вакуумный дуговой переплав (ВДП). Дуговые печи делятся на печи с нерасходуемыми электродами (обычно из вольфрама или графита) и печи с расходуемыми (расплавляемыми) электродами, имеющими тот же состав, что и получаемый металл. Печи с нерасходуемыми электродами применяются для выплавки тугоплавких металлов из шихты соответствующего состава, имеют сравнительно небольшие размеры и распространены незначительно. Для стали, титана и ряда сплавов применяются преимущественно печи с расходуемыми электродами. В этих печах металл полностью затвердевает в водоохлаждаемом кристаллизаторе, образуя слиток.

Расходуемый электрод является катодом, он приварен к штоку. Слиток направляется в водоохлаждаемый кристаллизатор, закрытый крышкой с гляделкой. Электрическая дуга горит между электродом и небольшой ванной жидкого металла. Для концентрации дуги и предотвращения перехода разряда на стенку кристаллизатора он окружен соленоидом с продольным магнитным полем. Металлическая "затравка", с помощью которой первоначально зажигается электрическая дуга, располагается на водоохлаждаемом поддоне. Положительный полюс от источника тока присоединяется к верхней части кристаллизатора. Отечественные печи рассчитаны на массу слитков от 175 кг до 37 т.

Электрошлаковый переплав (ЭШП). Суть способа состоит в следующем. При прохождении переменного тока через слой шлака с большим электросопротивлением выделяется тепло, которое расплавляет расходуемый электрод. Капли металла, проходя через слой шлака, очищаются от оксидных и сульфидных включений. Основу шлака (флюса) составляет CaF_2 с добавками различных оксидов (CaO , Al_2O_3 и др.).

Преимущество способа: небольшие по размеру капли металла имеют большую контактную поверхность со шлаком, что ведет к рафинированию металла. При ЭШП балл по оксидным и сульфидным уменьшается вдвое, растет пластичность, вязкость и другие механические свойства. Электрошлаковому переплаву необходимо подвергать шарикоподшипниковые стали, жаропрочные сплавы, конструкционные сплавы авиационного назначения.

Для получения сверхкрупных слитков в институте имени Е.О. Патона разработан способ *порционной электрошлаковой отливки (ПЭШО)*. Способ состоит в следующем.

В водоохлаждаемом кристаллизаторе с помощью нерасходуемых электродов расплавляется шлак. Электроды поднимаются и заливается первая порция металла. Залитый металл затвердевает под слоем шлака. Затем заливают следующую порцию металла, он смешивается с остатком жидкого металла первой порции и также затвердевает. Так повторяют несколько раз до заполнения изложницы.

Электронно-лучевой переплав (ЭЛП). В электронно-лучевых печах плавление шихты производится за счет энергии, которая выделяется при резком торможении свободных электронов. Пучок этих электронов направлен на металл (шихту). В вакуумной камере (10^{-4} ... 10^{-5} мм рт.ст.) друг против друга находятся катод и анод. При нагреве катод испускает поток электронов, который концентрируется с помощью фокусирующих устройств. При торможении этого пучка на металле выделяется энергия, которая расплавляет его. В качестве шихты используют прутки и сыпучие материалы.

В электронно-лучевых печах выплавляют слитки тугоплавких металлов (Mo, Nb, Ti, Zr), жаропрочных сплавов и сталей.

Плазменно-дуговой переплав (ПДП). В этих установках источником тепла является высокотемпературная плазма, т.е. ионизированный газ с температурой до 30000°C . Для этого применяют горелки с плазменной дугой, которая горит между катодом и шихтой.

Катод изготавливается из вольфрама. Он окружен водоохлаждаемым цилиндрическим соплом. Для образования плазменной дуги в зазор между катодом и соплом подается технический аргон (водород, гелий, азот). Анодом служит водоохлаждаемый медный электрод.

Емкость действующих плазменно-дуговых печей составляет от 25 кг до 10 т. Плавка идет практически без угара легирующих.

3. ПЛАВКА И ЛИТЬЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

3.1. Особенности плавки алюминиевых сплавов

Алюминиевые сплавы чаще всего выплавляют в индукционных печах, а также в тигельных и отражательных печах, работающих на электроэнергию, газообразном или жидком топливе. При этом плавильные печи работают в паре с миксером, что обеспечивает их максимальную производительность.

При плавке применяют следующую последовательность загрузки шихты: чушковый алюминий, отходы, переплав, лигатуры и чистые металлы. Расплавы перегревают до 800-300°C (литейные сплавы) и до 750-760°C (деформируемые сплавы) [1,2]. С целью защиты расплавов от окисления и насыщения водородом плавку ведут в вакууме или в атмосфере инертных газов [8,9]. Однако эти способы неэкономичны и малопродуктивны, поэтому в производственных условиях чаще всего применяют покровные флюсы (табл. 51).

Таблица 51

Состав и назначение покровных флюсов

Номер флюса	Состав флюса, % по массе	Назначение
1	45NaCl+55KCl	Для большинства сплавов, кроме алюминиево-магниевых
2	37NaCl+50KCl+6,6Na ₃ AlF ₆ +6,4CaF ₂	
3	42...46NaCl+43...47RCl+ +7...6Na ₃ AlF ₆	Для деформируемых сплавов, кроме алюминиево-магниевых
4	100MgCl ₂ KCl	Для алюминиево-магниевых сплавов
5	85MgCl ₂ KCl+15CaF ₂	
6	85MgCl ₂ KCl+15MgF ₂	
7	55...60KCl+45...50LiCl	Для алюминиево-литиевых сплавов

Рафинирование алюминиевых сплавов от металлических примесей (Na, Mg, Fe, Zn), оксидных включений и растворенного водорода производят продувкой инертными и активными газами, обработкой хлористыми солями, отстаиванием, вакуумированием и фильтрованием через зернистые, сетчатые и керамические фильтры, а также с помощью рафинирующих флюсов, состав которых приведен в табл. 52.

Таблица 52

Состав и назначение рафинирующих флюсов

Номер флюса	Состав флюса, % по массе	Назначение
1 2	47KCl+23Na ₃ AlF ₆ +35KCl+50NaCl+Na ₂ SiF ₆	Для всех сплавов, кроме алюминий-магневых
3 4 5 6	60MgCl ₂ CaCl+40CaF ₂ 12...15CKCl+80MgCl ₂ KCl+ 5...8BaC1 ₂ 80MgCl ₂ KCl+20KF ₂ 85MgCl ₂ KCl+15MgF ₂	Для сплавов, содержащих магний
7 8 9	90MgCl ₂ KCl+10K ₃ AlF ₆ 90MgCl ₂ KCl+10KF 90MgCl ₂ KCl+10AlF ₃	Для сплавов, содержащих магний
10 11 12 13	11,5KCl+56,5NaCl+7Na ₃ AlF ₆ +25NaF+25NaF 10KCl+50NaCl+10Na ₃ AlF ₆ +30NaF 45NaCl+15Na ₃ AlF ₆ +40NaF 40KCl+35NaCl+15Na ₃ AlF ₆ +10NaF	Рафинирующие и модифицирующие (универсальные) флюсы для системы Al-Si

Для измельчения макрозерна в расплавы вводят титан, цирконий, бор или ванадий в количестве 0,05-0,15% от массы расплава. Большой эффект модифицирования достигается введением титана и бора в виде тройной лигатуры Al-Ti-B в соотношении Ti:B = 5:1. На практике применяют модификаторы, состав которых указан в табл.53.

Таблица 53

Состав модификаторов и режимы модифицирования алюминиевых сплавов

Номер модификатора	Состав модификатора	Кол-во модификатора, %	Расчетное кол-во модифицируемого элемента, %	Температура модифицирования, °C
1	Лигатура Al-Ti (2,5)	1-3	0,05-0,15 Ti	720-750
2	Лигатура Al-Ti-B(5% Ti, 1% B)	1-2	0,05-0,1 Ti	720-750
3	«Зернолит» (55%K ₂ TiF ₆ +3%K ₂ SiF ₆ +27%KBF ₄ +15%C ₂ Cl ₆)	0,2-0,5	0,01-0,02 B	720-750
4	Флюс(35%NaCl+35%KCl+20%K ₂ TiF ₆ +10%KBF ₄)	0,5-1,0	0,01-0,02 B 0,5-1,0 Ti	720-750
5	Металлический натрий	0,05-0,1	0,05-0,1 Na	750-780
6	Флюс (67%NaF+33%NaCl)	1-2	0,05-0,1 Na	780-810
7	Флюс(62,5%NaCl+25%NaF+12,5% KCl)	1-2	0,05-0,1 Na	730-750
8	Флюс (50%NaCl+30%NaF+10%KCl+10%Na ₃ AlF ₆)	0,5-1,0	0,05-0,1 Na	720-750
9	Флюс (35%NaCl+40%KCl+10%NaF+15%Na ₃ AlF ₆)	1-1,5	0,05-0,1 Na	740-760
10	Лигатура Al-Sr(10%Sr)	0,6-0,8	0,06-0,85 Sr	750-780
11	Лигатура Cu-P(9-11%P)	0,5-1,0	0,05-0,1 P	790-820
12	20% красного P+10%K ₂ ZrF ₆ +70%KCl	1,5-2,0	0,05-0,1 P	790-825
13	58%K ₂ ZrF ₆ +34%порошка алюминия+8% красного P	0,3-0,4	0,05-0,1 P	790-825
14	Фосфорорганические в-ва (флорофос, трифенилфосфат)	0,4-0,6	0,05-0,1 P	760-780

Литейные доэвтектические, заэвтектические сплавы АК12(АЛ2), АК94(АЛ4), АК74(АЛ9), АК7Ц9(АЛ11), АК8Л(АЛ34) модифицируют натрием или стронцием для измельчения эвтектического кремния (модификаторы № 5-10).

Заэвтектические силумины с высоким содержанием кремния (> 13% Si) модифицируют фосфором (№11-14) [2,4].

3.2. Особенности технологии фасонного литья алюминиевых сплавов

Фасонные алюминиевые отливки можно получать практически любыми способами литья. Выбор того или иного способа литья определяется прежде всего требованиями, предъявляемыми к отливкам, техническими возможностями способа литья и экономическими соображениями. На практике около 75-80% алюминиевых отливок получают литьем в многократные формы (в кокиль, под давлением) и 20-25% - литьем в разовые формы (в песчаные, гипсовые, оболочковые, по выплавляемым моделям) [1].

Литье в песчаные формы. Типовыми составами для изготовления песчаных форм являются:

- 1) 90-97% оборотной смеси, 3-10% песка марки ПО, 1,4-6% воды;
- 2) жидкостекольная смесь, содержащая 95-97% песка марки КО1А, 3-5% глины, 5-6% жидкого стекла, 0,5-1,0% водного 10-20% раствора NaOH и 3,0-4,5% воды.

Стержни в основном изготавливают по горячим стержневым ящикам. Для этого применяют плакированный кварцевый песок или смесь песка с термореактивной смолой. Применяют также холодно-твердеющие (ХТС) и жидкоподвижные самотвердеющие (ЖСС) смеси.

Питание отливок осуществляется с помощью литниковых систем с соотношением площадей сечений стояка, шлакоуловителя и питателей $F_{ст}:F_{шл}:F_{пит} = 1:2:3; 1:2:4; 1:3:6$ соответственно для сифонного, вертикального и ярусного подвода металла. Для отливок из сплавов с узким интервалом кристаллизации: АК12(АЛ2), АК9Ч(АЛ40), АК7Ч(АЛ9), АК8Л(АЛ34), АК12М2МгН(АЛ25), АК12ММгН(АЛ30) усадочные

раковины выводят в массивные прибыли. При этом масса прибыли превышает массу отливки в 2-3 раза для тонкостенных и до 1,5 раза для толстостенных отливок. Для сплавов, склонных к образованию усадочной полости (сплавы с широким интервалом кристаллизации), применяют направленную кристаллизацию, установку холодильников из чугуна и алюминиевых сплавов, а также кристаллизацию под давлением 0,4-0,5 МПа. Температура расплава перед заливкой форм составляет 720-780° С.

Литье по выплавляемым моделям. Этот способ литья применяют для изготовления отливок повышенной точности (3-5 кл.) и чистоты поверхности (4-6 кл.). Модели чаще всего изготавливаются из парафиностеариновых (1:1) смесей. Для огнеупорного покрытия обычно используют суспензию из гидролизованного этилсиликата (30-40%) и пылевидного кварца (70-60%). Обсыпку блоков ведут песком КК016А или КК025А. Питание отливок осуществляют, как правило, от массивного стояка через утолщенные питатели. Заливку ведут в холодные и нагретые (50-300°С) формы. Температура расплава перед заливкой равна обычно 720-750°С.

Литье в оболочковые формы. Формы изготавливают по горячей металлической оснастке (250-300°С) бункерным способом с двуслойными оболочками: первый слой из смеси с 6-10% термореактивной смолы, второй из смеси с 2% смолы. Применяют мелкозернистые кварцевые пески. Полуформы склеивают клеем на специальных прессах (40% смолы МФ17; 60% маршалита и 1,5% $AlCl_3$ в качестве катализатора). При литье используют литниковые системы и режимы заливки, аналогичные литью в песчаные формы.

Литье в кокиль. Оно является основным способом массового и серийного производства алюминиевых отливок. Заливка расплава в кокиль производится при 680-750°С, скорость заливки составляет 0,15-3,0 кг/с.

Литье под давлением. Для литья под давлением применяют алюминиевые сплавы марок АК12(АЛ2), АК9Ч(АЛ4), АК7Ч(АЛ9), АК7Ц9(АЛ11), АМЧ5К(АЛ13), АМГ11(АЛ22), АМГ5МЦ(АЛ28), АК8М(АЛ32), АК8Л(АЛ34).

Изготовление отливок осуществляется на машинах с холодной горизонтальной или вертикальной камерой прессования с удельным давлением 30-70 МПа. Подвод металла производится с помощью внешних и внутренних литниковых систем.

Основной дефект литья - газовая пористость. Поэтому важным является подбор параметров литья: скорости и давления прессования, тепловых режимов пресс-формы. Существенно можно повысить плотность отливок литьем в вакуумированные пресс-формы, применением "кислородного процесса" (способ А.А.Рыжикова). Ниже приведены рекомендуемые температуры нагрева пресс-форм:

Толщина стенки отливки, мм, ... 1-2; 2-3; 3-5; 5-8.

Температура пресс-форм, °С, ...250-280; 200-250; 160-200; 120-160.

3.3. Изготовление слитков

Алюминиевые слитки получают литьем в изложницы или методами полунепрерывного литья. Наиболее широко применяются методы полунепрерывного литья. При этом слитки отливают на машинах с валковым приводом или опускающимся столом. Последние имеют механический или гидравлический привод. Схемы машин приведены на рис. 1.

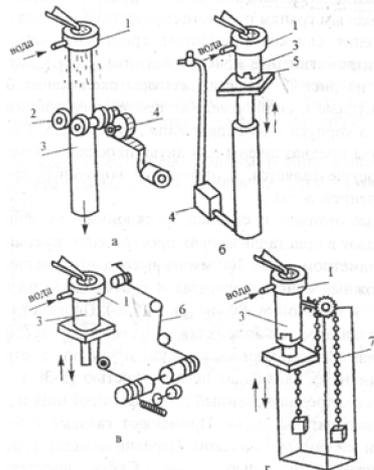


Рис. 1. Схемы машин полунепрерывного литья с валковым (а), гидравлическим (б), тросовым (в) и цепным (г) приводами: 1 - кристаллизатор; 2 – валки; 3 – слиток; 4 – привод; 5 - подвижной поддон; 6 – трос; 7 – цепь

На машинах полунепрерывного литья отливают сплошные (диаметр 55-1100 мм) и полые (наружный диаметр 150-840 мм, внутренний диаметр 50-600мм) цилиндрические слитки длиной 4000-6000 мм и плоские слитки толщиной 200-500 мм, шириной 900-1700 мм и 1000-6500 мм. Круглые слитки предназначены для производства профилей, прутков, поковок, штамповок и бесшовных труб, а плоские – для производства листов и плит. Слитки из пластичных низколегированных алюминиевых сплавов (АД00, АД0, АД1, АД, АМц, АМг и др.) из-за трудности их разрезки прокатывают вдоль направления литья и они имеют прямоугольное сечение. Легированные сплавы (Д1, Д16, Д19, Д20, АМГ3, АМГ5, АМГ6, АК8, АК4, АК6 и др.) склонны к трещинообразованию в начальные периоды прокатки. Поэтому прокатка этих слитков ведется поперек направления литья, для чего боковым граням придается треугольная форма с углом 110°. Для получения слитков применяют кристаллизаторы скольжения (КС) и электромагнитные кристаллизаторы (ЭМК), схемы которых приведены на рис. 21. Кристаллизаторы скольжения бывают двух типов: корпусные и гильзовые. Как правило, гильзы изготавливают из дюрала, а корпуса - из сплавов типа АК6 или Д1. Гильзовые кристаллизаторы предназначены для литья плоских слитков. В них охлаждение осуществляется, в отличие от корпусных кристаллизаторов, распылением воды.

Круглые отливки из сплавов, не склонных к трещинообразованию, получают в кристаллизаторах простой конструкции (рис. 2, а), а слитки диаметром более 300 мм из высоколегированных сплавов – в более сложных кристаллизаторах с конусностью по внутреннему диаметру 2° и высотой 60-80 мм (рис. 2, б). Полые отливки отливают в кристаллизаторах с водоохлаждаемым стержнем (рис. 2, в).

Выплавку алюминиевых сплавов проводят в отражательных или индукционных канальных печах емкостью 15-30 т. Сплавы сливают в миксер, предназначенный для рафинирования и доводки расплава до температуры литья. Применяют газовые и электрические (открытые и вакуумные) миксеры. Перелив металла из печи в миксер осуществляется с помощью сифона. Сифон представляет собой стальную трубу, фу-

терованную изнутри. Сифон имеет два колена. В верхней части он соединяется с вакуумным насосом. Перед началом перелива сифон нагревается, после чего создается разрежение.

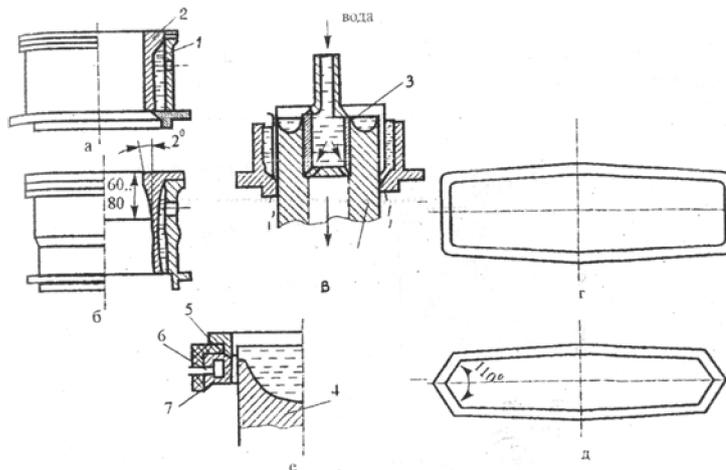


Рис. 2. Схемы кристаллизаторов: а, б - для отливок сплошных слитков; в - полых цилиндрических слитков; г, д - для отливки плоских слитков; е - электромагнитный кристаллизатор; 1 - корпус, 2 - гильза, 3 - водоохлаждаемый стержень, 4 - слиток; 5 - экран, 6 - корпус, 7 - индуктор

Печь, миксер и литейные машины расположены на разных уровнях для перелива металла из печи в миксер и из миксера в машину (рис. 3).

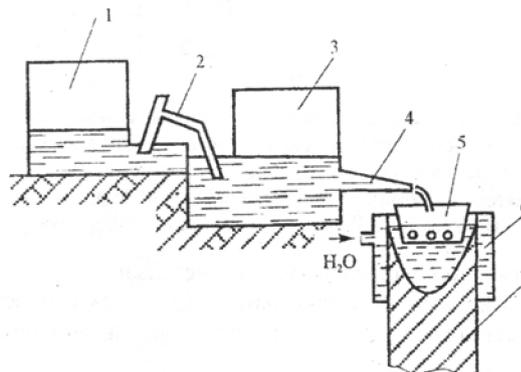


Рис. 3. Схема плавильно-литейного агрегата: 1 - плавильная печь; 2 - сифон; 3 - миксер; 4 - желоб; 5 - распределительная коробка; 6 - кристаллизатор; 7 - слиток

Расплав поступает из миксера через летку и желоб в кристаллизатор через распределительные устройства (рис. 4).

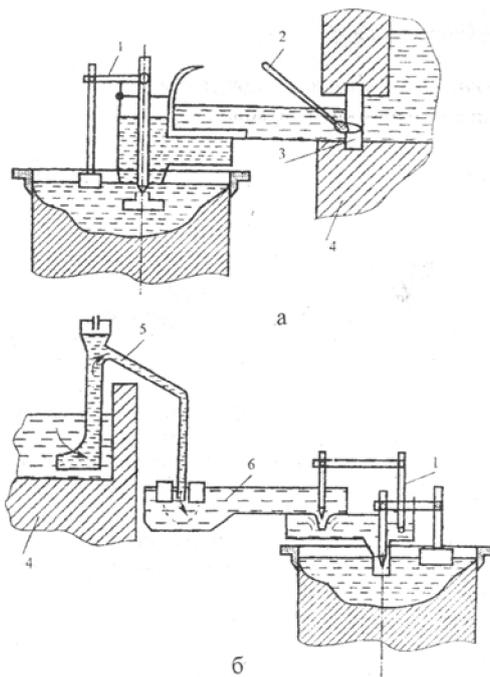


Рис. 4. Схема подачи расплава через летку с поплавковым регулятором (а) и сифоном с поплавковым регулятором подачи металла из миксера (б): 1 - поплавковый регулятор; 2 - ломик с шнуровым асбестом; 3 - шамотная плита; 4 - миксер; 5 - сифон; 6 - промежуточная коробка

Основными технологическими параметрами полунепрерывного литья, определяющими качество слитка, являются скорость литья, температура металла, высота кристаллизатора, интенсивность теплоотвода.

Высокая скорость литья, сверх оптимальной, приводит к образованию внутренних трещин и повышению пористости. Низкие скорости ведут к поверхностным трещинам и грубым неслитинам.

Повышение температуры литья выше оптимальной приводит к возникновению внутренних трещин и увеличению пористости. Низкая температура литья создает условия объемной кристаллизации и формирует грубое неоднородное строение слитка.

Температура расплава в миксере поддерживается на 50-100 °С выше температуры ликвидуса при литье круглых слитков и на 40-80 °С при литье плоских слитков.

Влияние высоты кристаллизатора аналогично влиянию температуры литья [2,3].

Оптимальные режимы литья круглых и плоских слитков приведены в табл. 54-56.

Таблица 54

Сплав	Диаметр слитка, мм	Высота кристаллизатора, мм	Скорость литья, м/ч	Температура литья, °С
АДЗ1, АДЗЗ, АД1, АМц	120-130	120	11-12	690-710
	220-240	150	9,1	690-710
	310-320	180	5	690-710
	430-440	180	3,3	690-710
АВ	120-130	120	9	690-710
	220-240	150	5,7	690-710
	430-440	180	2,2	690-710
Д1, АК6, АК8	120-130	120	13	680-700
	310-320	180	5	680-700
	640-650	180	1,9	680-700
АК4, АК4-1	120-130	120	12	700-720
	310-320	180	3,5	720-730
	650	180	1,26	720-730
Д16, Д18, В95, В93	120-130	120	9-12,5	690-710
	130-320	180	2,7-3,5	690-710
	650	180	1,2-1,26	690-710
АМг2, АМг3 АМг5, АМг6	120-130	120	11-12	690-710
	310-320	180	4-4,7	690-710
	650	180	1,4-1,6	690-710

Таблица 55

Сплав	Сечение слитков, мм	Скорость литья, м/ч	Температура литья, °С
АД, АД1	300-950	5,4-6,6	595-710
	300-124	5,4-6,6	700-720
Д1	210-1480	4,8-5,4	680-700
	240-1565	4,2-4,8	670-695
	290-1350	4,2-4,8	670-695
Д16	210-1480	6,3-6,9	670-685
	240-1565	4,5-5,4	690-705
	290-1350	4,8-5,4	665-685
АМг3, АМг5, АМг6	210-1480	3,6-4,8	680-700
	290-1670	3,0-3,9	680 700
В95	220-800	3,6-4,2	675-700
	300-1100	2,4-2,7	690-710

Таблица 56

Сплав	Температура литья, °С	Размеры слитков, мм		
		190	480	300-1650
АМц АМг2 АМг3 АМг5 АМг6	690-730	80-100/25-30	50-60/38-45	60-75/35-40
Д1	700-730	90-110/25-3	35-40/38-45	
АК6, АК8	700-730	80-90/25-30	20-30/38-45	70-90/35-40
Д16	720-740		20-30/38-45	
АК4, АД1	690-720	120-140/25-30	50-60/38-45	75-85/35-40

4. ПЛАВКА И ЛИТЬЕ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

4.1. Особенности плавки магниевых сплавов

Литейные магниевые сплавы имеют хорошие технологические свойства. Изготавливаются детали методом литья в песчаные, гипсовые и оболочковые формы, в кокиль, под давлением и по выплавляемым моделям. Для литья под давлением рекомендуются сплавы МЛ5, МЛ5ПЧ, МЛ6 и МЛ7-1.

Плавка и разливка магниевых сплавов имеют ряд особенностей, обусловленных большим сродством магния к кислороду, необычными теплофизическими свойствами и малой плотностью. По сравнению с алюминиевыми сплавами магниевые сплавы обладают большей усадкой, имеют более низкую теплопроводность, малое гидростатическое давление, повышенную склонность к образованию горячих трещин.

Магний и компоненты сплава легко окисляются, поэтому магниевые сплавы плавят с флюсами или в среде защитных газов. В состав флюса входят, как правило, хлористые и фтористые соли. При выплавке сплавов систем Mg-Mn, Mg-Al-Zn, Mg-Zn-Zr применяют флюсы, содержащие хлористый магний. Основой ряда флюсов является плавеный карналлит с добавками фтористого кальция. Составы некоторых флюсов приведены в табл. 57.

Таблица 57

Составы флюсов для плавки магниевых сплавов

Марка флюса	Состав, % по массе	Назначение
ВИ2	$38...46\text{MgCl}_2 + 32...40\text{KCl} + <10\text{CaCl}_2 + 5...8\text{BaCl}_2 + 3...5\text{CaF}_2 + <1,5\text{MgO} + 3\text{H}_2\text{O}$	Для плавки в стационарных печах и тиглях
ВИ3	$33...40\text{MgCl}_2 + 25...36\text{KCl} + <7\text{CaCl}_2 + 15...20\text{CaF}_2 + 7...10\text{MgO} + <3\text{M}_2\text{O}$	Для плавки в съемных тиглях
ФЛ5	$25...42\text{MgCl}_2 + 20...36\text{KCl} + 4...8\text{BaCl}_2 + 0,5...10\text{CaF}_2 + 3...11\text{MgF}_2 + 3...14\text{AlF}_3 + 1,8\text{B}_2\text{O}_3$	Единый флюс
ФЛ10	$20...35\text{MgCl}_2 + 16...29\text{KCl} + 8-12\text{BaCl}_2 + 14...23\text{CaF}_2 + 14...23\text{MgF}_2 + 0,5...8\text{B}_2\text{O}_3$	Универсальный флюс
№1	$80\text{LiCl} + 20\text{LiF}$	Для сплавов с литием
№2	$14...21\text{NaCl} + 47...51\text{CaCl}_2 + 26...29\text{BaCl}_2 + 2...5\text{CaF}_2 + <2\text{H}_2\text{O}$	Для сплавов с РЗМ
№4	$55\text{KCl} + 28\text{CaCl}_2 + 15\text{BaCl}_2 + 2\text{CaF}_2$	Для сплавов с торием и цирконием
ВАМИ 1	$3,5\text{CaF}_2 + 23,5\text{AlF}_3 + 40\text{B}_2\text{O}_3 + 33\text{Na}_3\text{AlF}_6$	Бесхлористые флюсы

В настоящее время нашла применение бесфлюсовая плавка магниевых сплавов в защитной газовой среде. Для этого используют смеси сухого воздуха с сернистым газом, фторидом бора или шестифтористой серой и чистый углекислый газ [4-7].

Магниевые сплавы плавят в стационарных тиглях, в выемных тиглях и дуплекс-процессом (индукционная или отражательная печь-тигель). Обычно тигель нагревают до 400-500° С, загружают и расплавляют флюс в количестве до 10% от массы шихты, затем небольшими порциями вводят куски шихты, предварительно подогретые до 120-150°С. После загрузки всех шихтовых материалов расплав нагревают до 700-720° С, после чего проводят рафинирование и модифицирование.

Дуплекс-процесс ведут в индукционных или отражательных печах емкостью 0,5-3,0 т под слоем флюса. Затем расплав переливают в выемные тигли, где осуществляется рафинирование и модифицирование.

Рафинирование магниевых сплавов проводят с целью удаления неметаллических примесей и растворенных газов (водород). Наиболее простой способ рафинирования - отстаивание расплава при температуре 750° С. Более эффективным способом является обработка расплава флюсом, основанная на процессах адсорбции жидкими солями. При этом расплав нагревают до 700-720° С, удаляют покровный флюс, вводят бериллий (0,001-0,002%) или кальций (0,05%), на поверхность расплава засыпают рафинирующий флюс ВИ2, ВИЗ (1% от массы расплава) и перемешивают расплав. Хлористый магний связывает оксид магния в соединение $MgCl_2 \cdot 5MgO$, частично происходит дегазация расплава. Более полная дегазация осуществляется продувкой расплавов газами (азот, аргон, хлор) или гексахлорэтаном (C_2Cl_6). Продувают расплав азотом при 660-685°С, аргоном и хлором - при 740-760°С. Значительно выше уровень очистки магниевых расплавов при фильтрации их через сетчатые или зернистые фильтры.

По склонности к измельчению зерна магниевые сплавы можно разделить на две группы - трудно модифицируемые (сплавы систем Mg-Mn и Mg-Al-Zn) и легко модифицируемые (сплавы систем Mg-Zn и Mg-РЗМ и чистый магний). Для второй группы сплавов основным модификато-

ром является цирконий (0,3-1,0%). Трудномодифицируемые сплавы обрабатывают введением в расплав углеродосодержащих веществ (мрамор, магнезит, гексахлорэтан, углекислый газ) или перегревом. При термическом расположении выделяется углекислый газ, который взаимодействует с магнием: $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$, $\text{CO}_2 + 2\text{Mg} = 2\text{MgO} + \text{C}$. Образующийся углерод связывает алюминий в карбид алюминия, который служит центром кристаллизации при охлаждении сплава. Режимы модифицирования приведены в табл. 58.

Таблица 58

Модификатор	Количество модификатора, % от массы шихты	Температура расплава, °С	Время отстаивания, мин	Примечание
Мел	0,5-0,6	760-780	45-40	Необходима просушка модификатора
Мрамор	0,5-0,6	760-780	15-40	
Магнезит	0,3-0,4	720-730	15-40	
Хлорное железо FeCl_2	0,5-1,0	750-770	10-40	В сухом состоянии
Цирконий	0,5-0,1	850-900	10-15	Для сплавов, не содержащих алюминий
Кальций	0,08-0,015	770-780	10-15	То же

При фасонном литье эффективно применение углеродосодержащих фильтров (совмещается рафинирование и модифицирование).

Модифицирование перегревом проводится в стальном тигле при температурах 850-925°С с выдержкой 10-15 мин, после чего расплав быстро охлаждается до температуры заливки 680-720°С.

При взаимодействии со стальным тиглем образуются дисперсные частицы FeAl_3 , являющиеся центрами кристаллизации. Эффект процесса зависит от содержания железа в расплаве.

4.2. Особенности технологии фасонного литья магниевых сплавов

Для получения качественных отливок применяют специальные меры при заливке форм. Заливка должна исключать возможность попадания в форму остатков флюса и окисления расплава. При заливке песчаных форм рекомендуется применять стальные литниковые чаши. Должны быть исключены завихрения потока расплава. Расплав необхо-

димо подводить в нижнюю, наиболее толстую часть отливки с помощью щелевого питателя, сечение которого больше сечения тела отливки. Литниковая система должна быть расширяющейся (отношение сечений литниковых каналов 1:3:6 или 1:2:4). В основании стояка помещают металлические сетчатые экраны. Для предупреждения окисления металла в форме в состав формовочных смесей вводят серу, борную кислоту, фтористый аммоний, мочевины и др.

Магниевые сплавы имеют повышенную склонность к образованию трещин. Поэтому стержни должны быть податливыми.

Литье в песчаные формы. Магний активно взаимодействует с кремнеземом формовочных и стержневых смесей: $\text{SiO}_2 + 2\text{Mg} = 2\text{MgO} + \text{Si}$.

В связи с этим в состав смесей вводят присадку ВМ, тормозящую указанную реакцию: 58-62% мочевины $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ + 13-17% борной кислоты HBO_3 + 15-19% нефелинового коагулянта $\text{Al}_2(\text{SO})_4$. Единая формовочная смесь обычно содержит 90-95% оборотной смеси, 5-10% песка KO_2 ; 0,2-0,3% ортофосфорной кислоты, плотностью 1,29-1,30 г/см³, 3%; 0,25-0,60% борной кислоты; 3,5-4,0% смолы МЗ; 1,0-2,0% воды. Составы типовых стержневых смесей с защитными добавками (сера и борная кислота) приведены в табл.59

Таблица 59

Составы типовых стержневых смесей

Типы стержней	Песок		Защитные добавки		
	КО2А или КО2Б	ПО16 или ПО063	Связующие	Сера	Борная кислота
Сухие стержни	90-95	5-10	2,0-2,5 МЗ 0,5-0,7 КМЦ	0,5-1,0	0,1-0,2
Стержни, изготавливаемые в горячих ящиках	100	—	Смола 180 (раствор)	—	0,25
Стержни, изготавливаемые в холодных ящиках	100	—	2,5-3 МЗ	—	0,25

Литье в кокиль. Магниевые сплавы имеют низкую плотность, широкий интервал кристаллизации, характеризуются повышенной склонностью к образованию усадочных напряжений и пониженной жидкотекучестью. Все это обуславливает следующие особенности литья в кокиль: осуществление подвода металла сифоном и через щелевой пи-

татель; установка массивных прибылей (150-200% от массы отливок); температура кокилей 300-350° С; металлических стержней - 350-350° С; быстрое извлечение металлических стержней из отливок и отливок из форм (при 350-400° С).

Оптимальной температурой заливки кокилей является 680-740°С.

Литье под давлением. Чаще всего для литья под давлением применяют сплавы МЛ5 и МЛ6, имеющие высокие литейные свойства. Применяют при литье расширяющиеся литниковые системы. Предпочтительнее для литья машины с горячей камерой прессования. Режимы литья приведены в табл. 60.

Таблица 60

Оптимальные режимы литья магниевых сплавов под давлением

Толщина стенок отливок, мм	Скорость впуска, м/с	Температура пресс-формы, °С	Температура расплава, °С
6-8	25-40	180	620-640
3-6	30-50	200	630-650
1,5-3,0	60-80	260	640-680

4.3. Производство слитков из магниевых сплавов

Деформируемые магниевые сплавы плавят под флюсом в отражательных или индукционных печах [4,7].

Затем расплавы переливаются в миксеры, где выдерживаются в течение 20-30 мин. Металл поступает из миксера в кристаллизатор с помощью центробежных и электромагнитных насосов через сетчатые или зернистые фильтры. При этом для сплавов систем Mg-Mn и Mg-Al-Zn-Mn, склонных к формированию крупнозернистой столбчатой структуры, применяют электромагнитное перемешивание расплава в кристаллизаторе (сплавы МА1, МА8, МА2, МА11). Индуктор при литье крупных слитков располагают над расплавом, а для слитков малых сечений - по периметру кристаллизатора.

В настоящее время отливают круглые слитки магниевых сплавов диаметром 250-800 мм и плоские слитки сечением 160-550-300-900 мм и длиной до 6 м. Для литья применяют в основном тросовые и цепные

литейные машины со скоростью опускания стола 2-20 см/мин. Отливка производится в корпусные и гильзовые кристаллизаторы. Режимы литья приводятся в табл. 61.

Таблица 61

Оптимальные режимы литья магниевых сплавов, температура °С

Сплав	Скорость литья, мм/мин	В миксере	В воронке	Давление воды, МПа
		Температура металла, °С		
МА1	5	720-750	700-720	0,04-0,15
МА2	5,0-5,5	720-750	700-720	0,04-0,12
МА3	5	690-710	670-690	0,04-0,12
МА5	6	690-710	670-690	0,04-0,12
МА8	6,5	720-750	700-720	0,04-0,12
МА11	4,8-5,0	720-750	700-720	0,04-0,15
МА14	2,4	710-730	690-710	0,10-0,25
МА15	5	710-730	690-710	0,04-0,12
МА17	5	740-755	710-730	0,04-0,15

5. ПЛАВКА И ЛИТЬЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

5.1. Особенности плавки титановых сплавов

Титан активно взаимодействует с окружающей средой: газами огнеупорами и другими материалами. С кислородом титан образует оксид TiO_2 , под слоем которого находится рыхлая прослойка из TiO_2 и TiO и слоя титана с повышенным содержанием кислорода (альфированный слой). Кислород стабилизирует α -фазу, упрочняет титан и снижает пластичность и вязкость. Каждая сотая доля процента кислорода (до 0,2%) повышает прочность на 12,3 МПа, твердость на 39 МПа, снижает пластичность на 1-2%. Поэтому содержание кислорода в титановых сплавах не должно превышать 0,15-0,2%.

Азот также стабилизирует α -фазу, но сильнее, чем кислород, упрочняет титан. Каждая сотая доля процента азота повышает предел прочности на 19,6 МПа и твердость на 59 МПа. В связи с этим содержание азота в титановых сплавах не должно быть более 0,04-0,05% [5,8].

Титан активно поглощает водород (до 400 cm^3/g). При этом растворимость водорода с повышением температуры снижается и поэтому при плавке большая часть водорода удаляется из металла. Водород стабилизирует α -фазу и охрупчивает титан. Содержание водорода в титановых сплавах ограничивают 0,010-0,015 %.

Углерод образует с титаном устойчивый карбид TiC и охрупчивает его. Так, каждая сотая доля углерода увеличивает предел прочности на 7 МПа и твердость на 19 МПа.

Высокая химическая активность титана к газам и огнеупорам требует плавки титановых сплавов в вакууме или инертной среде. Чаще применяют вакуумную плавку с совмещением заливки форм в вакууме. Обычно плавку [9] ведут в вакуумных дуговых графитовых гарнисажных печах с расходуемым электродом (рис.5).

Плавку ведут следующим образом [10]. Титановый возврат (прибыли, брак и т.п.), прошедший механическую и химическую очистку, укладывают на дно графитового тигля. Печь герметизируют и зажигают

дугу между электродом и кусками отходов. Толщину гарниссажа поддерживают оптимальной регулированием мощности электрической дуги и интенсивности теплоотвода. Плавку ведут до получения необходимого количества жидкого металла, после чего заливают литейную форму. Степень разрежения в камере плавильно-заливочной установки не должна превышать 0,13-1,33 Па.

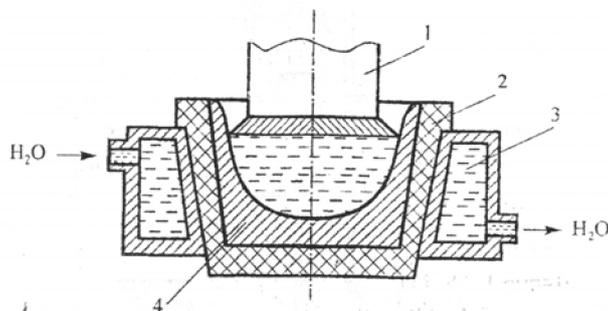


Рис.5. Схема вакуумной дуговой гарниссажной плавки: 1 - расходный электрод; 2- графитовый тигель; 3 – охлаждение; 4 - гарниссаж

В конструкцию плавильно-заливочных установок входят: вакуумная дуговая гарниссажная печь (ВДГП), заливочная камера, механизмы загрузки и выгрузки форм, откачная система, источник питания. Для питания применяют постоянный ток, чтобы обеспечить стабильность горения дуги.

Различают две группы плавильно-заливочных устройств: с разливкой металла при горячей дуге и с разливкой металла после отключения дуги.

Для титановых сплавов характерна невысокая жидкотекучесть, поэтому все промышленные плавильно-заливочные установки имеют центробежные устройства для вращения форм (200-400 об/мин).

В ВДГП наиболее широко применяют графитовые тигли, реже медные и стальные [10].

В отечественной практике нашли применение плавильно-заливочные установки моделей 833Д, ВДЛ-4, "Нева-2" ДВЛ-250, ДВЛ-160М, ДТВГ-0, 6ПЦ и др. Принципиальная схема гарниссажной печи показана на рис. 6.

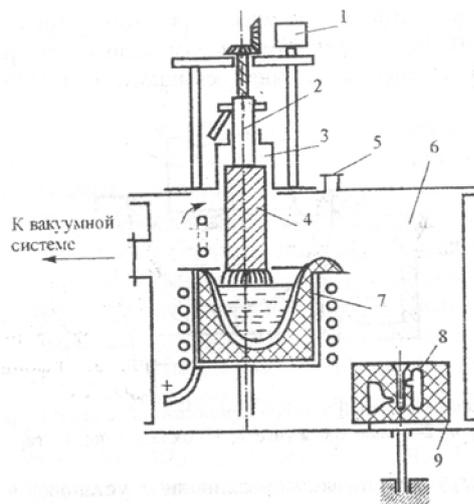


Рис.6. Принципиальная схема гарниссажной печи: 1 - привод; 2- электро-додержатель; 4 - расходуемый электрод; 5 - смотровой люк; 6 - камера; 7 - тигель; 8 - форма; 9 - центробежная установка

Принцип гарниссажной плавки в вакууме совершенствуется в настоящее время заменой источника энергии - электрической дуги. Вместо дуги используют плазму или поток электронов. Находит также применение индукционная плавка в холодных тиглях.

5.2. Особенности технологии фасонного литья титановых сплавов

Технологические особенности литья обусловлены химической активностью, высокой температурой плавления, низкой плотностью и невысокой жидкотекучестью титановых сплавов. Титан более стоек по отношению к углеродным материалам (графит, пироуглерод, кокс и др.), поэтому в промышленности нашли широкое применение углеродные формовочные смеси (графитовый порошок определенного гранулометрического состава). В качестве связующего здесь применяют синтетические смолы (фенольно-формальдегидные, фурановые и др.). Кроме углеродных используют также керамические формовочные смеси на основе трудновосстановимых окислов (электрокорунд, магнезит, двуокись циркония). Для повышения химической стойкости керамиче-

ских форм на их рабочую поверхность наносят покрытия, в состав которых входят вольфрам, молибден, графит и другие материалы.

Невысокая жидкотекучесть, малая плотность, существенная разница в температурах литья (1750-2000°C) и форм (20-30°C) резко ухудшают заполняемость литейных форм, а отсутствие атмосферного давления затрудняет условия питания отливок. Поэтому широко применяют заливку титановых сплавов во вращающиеся формы. Под действием центробежных сил резко повышается заполняемость форм и улучшаются условия питания отливок. Чаще всего титановые сплавы отливают в разовые формы (набивные, прессованные, по выплавляемым моделям, оболочковые) и реже - в многократные формы (кокиль, под давлением).

Заливку ведут в стационарные или вращающиеся формы. При стационарной заливке применяют расширяющиеся литниковые системы с нижним или боковым подводом расплава. Сифонный подвод металла используется при центробежной заливке. Схема заливочного контейнера приведена на рис. 7.

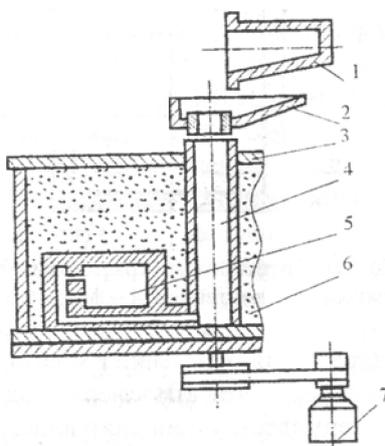


Рис.7. Схема заливочного контейнера: 1 - тигель; 2 - приемно-направляющий лоток; 3 - контейнер; 4 - центральный стоек; 5 - форма; 6 - наполнитель; 7 - привод

Литье в уплотняемые формы. Уплотняемые литейные формы изготавливают в основном из углеродных формовочных смесей методами набивки, прессования или встряхивания. Углеродные смеси разделяют

ся на смеси холодного и горячего отверждения. К первой группе относятся смеси марок СГУ-1, СГУ-3, ВГУ-1 и др. В смесях этого типа отверждение происходит в результате полимеризации связующего (смола) при введении катализатора (например, водный раствор соляной кислоты).

К смесям горячего отверждения относятся СГУ-2, СФТ-1, СФТ-3, АТМ и др. В этих смесях полимеризацию связующего ведут нагревом в печах.

Процесс изготовления углеродных форм складывается из следующих основных операций: приготовление смеси; изготовление полуформ и стержней, отверждение, обжиг, сборка форм.

Обжиг форм и стержней проводят в периодических или методических печах в специальных контейнерах (рис. 8).

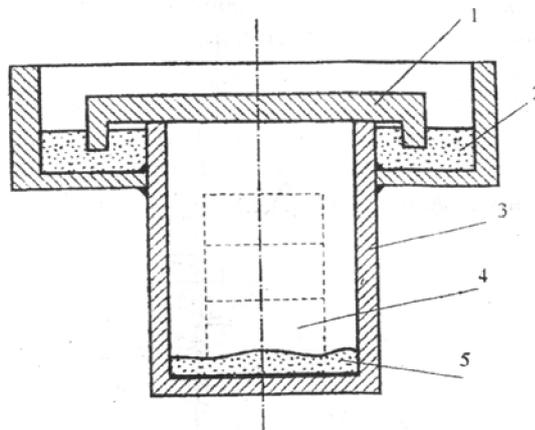


Рис.8. Контейнер для обжига графитовых форм: 1 - крышка; 2 - песчаный затвор; 3 - контейнер; 4 - формы; 5 - графитовая засыпка

Для предотвращения окисления графита нагрев ведут в восстановительной атмосфере. Эта атмосфера создается газами, которые выделяются при термодеструкции связующего вещества, входящего в состав смеси. Для повышения термохимической стойкости форм обжиг проводят в вакууме. Режимы обжига зависят от состава смесей.

Литье по выплавляемым моделям. Чаще всего его применяют для получения сложных тонкостенных отливок. При этом формы изготов-

ливают аналогично процессу получения форм для литья сталей и жаропрочных сплавов. Широко применяются модельные составы типа ПС-50-50 (50% парафина + 50% стеарина), Р-3 (58% парафина + 25% церезина + 12% буроугольного воска + 5% других компонентов), КПсЦ-50-30-20 (50% канифоли + 30% полистироля + 20% церезина), ВИ-АМ102 (20% парафина + 50% буроугольного воска + 25% торфяного воска+5% других компонентов) и др.

Для получения керамических оболочек применяют три вида огнеупорной суспензии, приготовленной на электрокорунде, графите и коксе.

При изготовлении электрокорундовых форм связкой служит гидролизированный этилсиликат. В приготовленный этилсиликат вводят смесь порошков электрокорунда (20% микропорошка М7, М10 или М14 + 40% шлифпорошка №3+40% шлифпорошка №4) в соотношении 400-450 см³ гидролизованного этилсилката на 1кг порошка. Обсыпку оболочек ведут электрокорундом № 32, 40, 63, 80. Послойная сушка оболочек осуществляется на воздухе или в вакуумно-аммиачных камерах. После удаления модельной массы форму прокаливают при 970-1000°С.

Электрокорундовые формы для литья титана нашли ограниченное применение из-за взаимодействия жидкого титана с формой.

Наиболее широко применяются графитовые формы. В качестве связки используют фенольно-формальдегидные смолы. Смолу разбавляют спиртом до плотности 0,95-0,96 г/см³ и вводят порошки графита (75-80% порошка марок ГМЗ, ЭК + 20-25% коллоидного графита). В состав огнеупорной суспензии входит: 20-25% связующего (смола ВИАМ) + 7-9% отвердителя (контакт Петрова) + 30-36% растворителя (этиловый спирт) + наполнитель (графитовый порошок). Обсыпку оболочек производят графитовыми порошками зернистостью 0,1-1,5мм. После выплавления модельной массы графитовые оболочки прокаливают в две стадии. На первой стадии оболочки нагревают до 800-850°С в печах с графитовым затвором, вторую стадию прокалики проводят в вакуумных печах с индукционным нагревом. Указанное обеспечивает высокое качество отливок для литья ответственных изделий.

Процесс изготовления коксовых форм аналогичен технологии получения графитовых. Отличие состоит в том, что коксовые оболочки прокаливают при 1300-1500°C.

Литье в оболочковые формы. В состав формовочной смеси входят связующее (синтетические смолы) и наполнитель (графитовый порошок). Наиболее широко применяются графитовые смеси СГО-3 (для мелких и средних отливок) и СГО-4 (для крупных отливок ответственного назначения). Технологический процесс изготовления графитовых оболочковых форм во многом подобен процессу получения форм на основе кварцевого песка.

Литье под давлением. Пока оно не получило широкого применения, однако этому способу уделяется большое внимание. Пресс-формы изготавливают из жаропрочных сталей или титановых сплавов ВТ5, ВТ5-1. Чаще всего используют молибденовые вставки, а камеры прессования изготавливают из сплава ЖС6. Перед литьем пресс-форму нагревают до 450-500°C. Применяют для литья сплавы с хорошими литейными свойствами (узкий интервал кристаллизации, хорошая жидкотекучесть, низкая склонность к трещинообразованию). Удовлетворяют этим требованиям сплавы марок ВТ5Л и ВТ20Л.

5.3. Производство титановых слитков

В настоящее время титановые слитки изготавливают главным образом в вакуумных дуговых печах с расходуемым электродом [11]. Расходуемый электрод получают в основном прессованием исходных шихтовых материалов (титановая губка и легирующие компоненты). Для достижения однородного состава полученный после первого переплава слиток вновь переплавляют. Расходуемым электродом при втором переплаве является слиток первого переплава.

Современные вакуумные дуговые печи позволяют получать титановые слитки массой до 30 т, диаметром до 1400 мм и длиной до 5 м из сплавов марок ВТ1Л, ВТ20Л, ВТ5Л, ВТ3-1Л, ВТ9Л, ВТ14Л. В отечественной практике нашли применение печи типов ДСВ-5, ДТВ, ВД-11

и др. Технические характеристики некоторых печей серий ДТВ и ДСВ приведены в табл. 62.

Таблица 62

Техническая характеристика печей серий ДТВ и ДСВ

Параметры	ДСВ-6,3-16	ДСВ-8,2-Г16	ДТВ-6,5-Г6	ДТВ-8,7-Г10
Макс. диаметр кристаллизатора, мм	630	820	650	1000
Наибольшая длина расходуемого электрода, мм	4550	6000	5450	5600
Масса слитка, т	6,0	16,0	5,5	10,3
Длина слитка, мм	2700	4000	4000	4000
Напряжение, В	75	75	75	75
Номинальный ток, А	25	25	25	37,5
Расход охл. воды, м ³ /ч	70	90	70	80

При переплаве слиток формируется в медном водоохлаждаемом ("глухом") кристаллизаторе. Схема печи типа ДСВ показана на рис. 9.

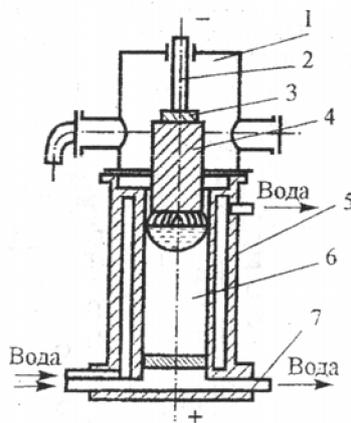


Рис.9. Схема печи типа ДСВ: 1 - вакуумная камера; 2 - электрододержатель; 3 - огарок; 4 - расходуемый электрод; 5 - изложница (кристаллизатор); 6 - слиток; 7 - поддон

Необходимая степень разрежения в печи создается откачной системой, состоящей из плунжерного форвакуумного насоса (ВН-6, ВН-300 и др.) и бустерного насоса (ДВН-500, 2ДВН-1500). Для получения качественного слитка давление в зоне горения должно быть равным около 13,3 Па (10^{-1} мм рт. ст.), в камере печи - 1,33 Па (10^{-2} мм рт. ст.).

Важнейшая часть печи - изложница. Она состоит из медного кристаллизатора и корпуса, между которыми циркулирует вода. На корпус намотан соленоид. Переменное магнитное поле соленоида перемешивает металлическую ванну, что способствует растворению и выравниванию состава сплава. Рабочая часть поддона изготавливается из меди. Поддон закрывается снизу стальной крышкой. Ниже показана схема изложницы (рис.10).

Технология изготовления титановых слитков включает следующие основные этапы: изготовление расходуемого электрода; получение слитка первого перепада; получение слитка второго перепада; механическая обработка слитка.

Расходуемый электрод для первого перепада получают прессованием шихтовых материалов. В состав шихты входят титановая губка, титановые отходы и легирующие компоненты. Для получения слитка однородного химического состава все элементы, значительно отличающиеся по температуре плавления от титана (W, Mo, Al и др.), вводят в шихту в виде лигатур. Если компоненты сплава имеют близкую к титану температуру плавления, то их вводят в виде технически чистых металлов.

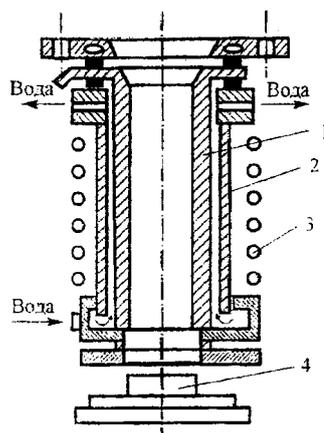


Рис.10. Схема изложницы: 1 - кристаллизатор; 2 - корпус; 3 - соленоид;
4 - поддон

Расходуемые электроды для первого переплава изготавливают прессованием на горизонтальных и вертикальных гидравлических прессах через конусную или цилиндрическую матрицу. Одна из схем прессования приведена на рис. 11.

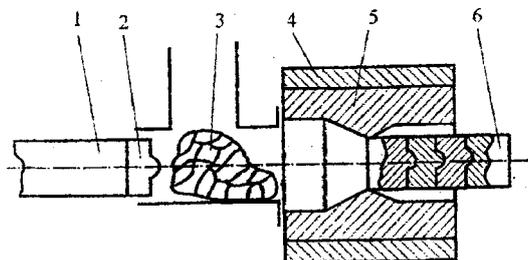


Рис. 11. Схема прессования расходного электрода через конусную матрицу:
1 - пресс-штемпель; 2 - пресс-шайба; 3 - шихта; 4 - контейнер; 5 - матрица;
6 - электрод

Полученный электрод переплавляют в вакуумной дуговой печи и получают слиток. Второй переплав этого слитка производится с целью получения химически однородного металла. Слиток второго переплава обтачивают на глубину 5-20 мм.

Титановые слитки получают также с применением гарниссажной плавки. Изготовленный прессованием электрод расплавляют в гарниссажном тигле и расплав сливают в изложницу.

Перспективный способ - "гарниссаж - расходный электрод" (ГРЭ). В этом случае отходы расплавляют в гарниссажной печи, расплав сливают в изложницу и получают слиток, который затем используется как расходный электрод.

6. ПЛАВКА И ЛИТЬЕ СТАЛЕЙ И ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ

В основном плавка и литье жаропрочных сталей и сплавов на никелевой основе по применяемому оборудованию и оснастке, а также по некоторым технологическим особенностям аналогичны. В связи с тем, что плавка и литье стальных изделий достаточно полно рассмотрены в учебной литературе, в этой главе уделено основное внимание сплавам на никелевой основе, предназначенным для изготовления деталей ответственного назначения.

Для никеля и никелевых сплавов характерна повышенная склонность к взаимодействию с газами. Так, жидкий никель растворяет при 1600 °С около 0,5% кислорода и до 43 см³/100 г водорода. При охлаждении расплава водород выделяется, что приводит к газовой пористости отливок. Поэтому плавку ведут под слоем флюса (стекло, плавиковый шпат, известь, молотый магнезит со стеклом). Для рафинирования никелевых сплавов от растворенных газов при плавке наводят окислительный шлак, в состав которого входят $MnO_2 + CuO + Na_2CO_3 + SiO_2$, или расплав продувают инертными газами. Перед легированием сплав раскисляют марганцем, углеродом.

Технологические особенности литья никелевых сплавов связаны прежде всего с повышенной склонностью к газонасыщению и относительно большой усадкой ($\approx 2\%$). Поэтому песчаные формы должны быть податливыми, иметь низкую газотворность и высокую газопроницаемость. Отливки ответственного авиационного назначения получают литьем по выплавляемым моделям или в керамические формы (ШОУ-процесс). Расплав с температурой 1600-1700°С заливают в формы через расширяющиеся литниковые системы с подводом металла в тонкие части отливки. Объем прибыли принимают обычно на 20-50% больше объема питаемого узла. Направленное затвердевание обеспечивается установкой холодильников и прибылей над массивными узлами. В качестве внутренних микрохолодильников используют порошок никеля [12]. Характеристика вакуумных печей приведена в табл. 63.

Технологические процессы изготовления сложных фасонных отливок из жаропрочных никелевых сплавов и высоколегированных сталей (крупногабаритные отливки, турбинные лопатки, деформирующий инструмент) рассмотрены подробно [13].

Таблица 63

Характеристика вакуумных индукционных печей для плавки и заливки

Параметры	Печи периодического действия ИСВ-04-ПФ-И2	Печи непрерывного действия ИСВ-ОД6-НФ-И1
Емкость тигля, т	0,04	0,016
Установленная мощность, кВт	250	525
Частота контура питающей сети, Гц	2400	2400
Максимальная температура распл., °С	1650	1700
Предельное разрежение, Па (мм рт.ст.)	5,0-0,33(3,2 × 10 ⁻² -2,2 × 10 ⁻⁴)	5,0-0,33(3,2 × 10 ⁻² -2,2 × 10 ⁻⁴)
Габариты форм, м (ширина × длина × высота)	0,5×0,6×1,0	0,7×1,6×1,0
Масса печи, т	10	30

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галдин, Н.М. Литниковые системы для отливок из легких сплавов / Н.М. Галдин. - М.: Машиностроение, 1978. – 198 с.
2. Ливанов, В.А. Непрерывное литье алюминиевых сплавов / В.А. Ливанов, Р.М. Габидулин, В.С. Шпилов. - М.: Metallurgy, 1977. – 168 с.
3. Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор / З.Н. Гецелев, Г.А. Балахонцев, Ф.И. Квасов [и др.]. – М.: Metallurgy, 1983. – 152 с.
4. Магниеые сплавы: справочник / под ред. М.Б. Альтмана. – М.: Metallurgy, 1978. – 296 с.
5. Курдюмов, А.В. Производство отливок из сплавов цветных металлов / А.В. Курдюмов, М.В. Пикунов, В.М. Чурсин. - М.: Metallurgy, 1986. – 416с.
6. Захаров, А.М. Промышленные сплавы цветных металлов / А.М. Захаров. - М.: Metallurgy, 1980. – 256 с.
7. Курдюмов, А.В. Литейное производство цветных и редких металлов / А.В. Курдюмов, М.В. Пикунов, В.М. Чурсин. - М.: Metallurgy, 1982. – 351с.
8. Производство фасонных отливок из титановых сплавов / Е.Л. Бибиков, С.Г. Глазунов, А.А. Неустроев [и др.]. – М.: Metallurgy, 1983. – 296 с.
9. Плавка и литье титановых сплавов / А.Л. Андреев, Н.Ф. Аношкин, К.М. Борзцовская [и др.]. – М.: Metallurgy, 1978. – 383 с.
10. Неустроев, А.А. Вакуумные гарниссажные печи / А.А. Неустроев, Г.Л. Ходоровский. — М.: Metallurgy, 1967. – 272 с.
11. Добаткин, В.И. Слитки титановых сплавов / В.И. Добаткин, Н.Ф. Аношкин, А.Л. Андреев. – М.: Metallurgy, 1966. – 286 с.
12. Орлов, Н.Д. Фасонное литье из сплавов тяжелых цветных металлов: справочник / Н.Д. Орлов, В.М. Чурсин. – М.: Машиностроение, 1971. – 256 с.
13. Заббаров, Р. Основы плавки и литья металлов: учеб. пособие / Р. Заббаров. – Самара: Изд-во СГАУ, 2006. – 170с.

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Таблица П1.1

Единицы СИ

Величина	Единицы измерения	Обозначение единицы
<i>Основные единицы</i>		
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	ампер	А
Термодинамическая температура	кельвин	К
Количество света	моль	моль
Сила света	кандела	кд
<i>Производные единицы</i>		
Плотность	килограмм на кубический метр	кг/м ³
Удельный вес, удельная сила	ньютон на кубический метр	Н/м ³
Сила, вес	ньютон	н
Нормальное и касательное напряжения, давление	паскаль	Па
Энергия, работа	джоуль	Дж
Мощность	ватт	Вт
Поверхностное натяжение	ньютон на метр	Н/м
Динамическая вязкость	паскаль·секунда	Па·с
Кинематическая вязкость	квадратный метр на секунду	м ² /с
Ударная вязкость	джоуль на квадратный метр	Дж/м ²
Плотность электрического тока	ампер на квадратный метр	А/м ²
Электрическое напряжение	вольт	В
Электрическое сопротивление	ом	Ом
Частота электрического тока	герц	Гц
Температурный коэффициент	кельвин в минус первой степени	К ⁻¹
Теплоемкость системы	джоуль на кельвин	Дж/К
Удельная теплоемкость	джоуль на килограмм-кельвин	Дж/(кг·К)
Коэффициент теплообмена, теплопередачи	ватт на квадратный метр-кельвин	Вт/(м ² ·К)
Теплопроводность	ватт на метр-кельвин	Вт/(м·К)

Таблица П 1.2
Температурные шкалы и единицы (градусы и кельвин)

Шкала	Единица измерения	Обозначение единицы	Точка таяния	Точка кипения воды
Цельсия	градус	°C	0	100
Абсолютная	кельвин	К	273,16	373,16
Реомюра	градус	°R	0	80
Фаренгейта	градус	°F	32	212

Примечание. Соотношения между единицами температуры: $1^{\circ}\text{C} = 1\text{K} = 0,8^{\circ}\text{R} = 1,8^{\circ}\text{F}$. Расчетная формула - $t_{c^{\circ}} = 0,8R^{\circ} = (t_{F^{\circ}} - 32)1,8 = (t_{c^{\circ}} - 273,16)\text{K}$.

Таблица П1.3
Единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ

Величина	Единица измерения	Обозначение единицы
Частота вращения	Оборот в секунду, оборот в минуту	об/с, об/мин
Объем	литр	л
Масса	тонна, грамм	т, г
Плоский угол	градус, минута, секунда	...°, ...', ..."
Время	сутки, час, минута	сут, ч, мин
Температура	градус Цельсия	°C

Таблица П1.4
Условные обозначения основных элементов в марках металлов и сплавов

Элементы	Принятое обозначение эл-тов в марках металлов и сплавов		Элементы	Принятое обозначение эл-тов в марках металлов и сплавов		Элементы	Принятое обозначение эл-тов в марках металлов и сплавов	
	черных	цветных		черных	цветных		черных	цветных
Азот	А		Кадмий	Кд	Кд	Ртуть		Р
Алюминий	Ю		Кобальт	К	К	Рутений		Ру
Барий	-	Бр	Кремний	С	Кр(К)	Самарий		Сам
Бериллий	Л		Лантан		Ла	Свинец		С
Бор	Р		Литий		Лэ	Селен	Е	ст
Ванадий	Ф	Ван	Лютеций		Л юм	Серебро		Ср
Висмут	Ви	Ви	Магний	Ш	Мг	Скандий		Скм
Вольфрам	В		Марганец	Г	Мц	Сурьма		Су
Гадолиний		Гм	Медь	Д	М	Таллий		Тл
Галлий	Гл	Гл	Молибден	М		Тантал		Та
Гафний		Гф	Неодим		Им	Теллур		Т
Германий		Г	Никель	Н	Н	Тербий	Т	Том
Гольмий		ГОМ	Ниобий	Б	Нп	Титан		ТГЩ
Диспрозий		ДИМ	Олово		О	Тулий	У	ТУМ
Европий		Ев	Осмий		Ос	Углерод	П	
Железо		Ж	Палладий		Пд	Фосфор	Х	Ф
Золото		Зл	Платина		Рл	Хром		Х
Индий		Ин	Празео- дим		Пр	Церий		Се
Иридий		И	Рений		Ре	Цинк	Ц	Ц
Иттербий		ИТМ	Родий		Рд	Цирконий		ЦЭВ
Иттрий		ИМ				Эрбий		Эрм

Таблица П1.5

Сравнительные значения твердости, измеренные различными методами

P = 30000 Н ∅ = 10 мм t = 10-15 с		Твердость по Роквеллу			Твердость по Виккерсу, МПа	Временное сопротивление σ _в , МПа (углеродистые стали)
Диаметр отпечатка, мм	Твердость по Бринеллю, НВ	HRC	HRA	HRB		
1	2	3	4	5	6	7
2,2	780	72	89	-	12240	-
2,25	745	70	87	-	11160	-
2,3	712	68	85,5	-	10220	-
2,35	682	66	84,5	-	9410	-
2,4	653	64	83,5	-	8680	-
2,45	627	62	82,5	-	8040	-
2,5	601	60	81	-	7460	-
2,55	578	58	80	-	6940	-
2,6	555	56	79	-	6490	-
2,65	534	54	78	-	6060	-
2,7	514	52	77	-	5870	-
2,75	495	50	76	-	5510	1780
2,8	477	49	75,5	-	5340	1720
2,85	461	48	74,4	-	5020	1650
2,9	444	46	73,5	-	4730	1600
2,95	429	45	73	-	4500	1550
3	415	44	72,5	-	4350	1490
3,05	401	42	71,5	-	4120	1440
3,1	388	41	71	-	1010	1395
3,15	375	40	70,5	-	3900	1350
3,2	363	39	70	-	3800	1305
3,25	352	38	69	-	3610	1265
3,3	341	37	68	-	3440	1225
3,35	331	36	68,5	-	3350	1195
3,4	321	35	68	-	3200	1155
3,45	311	34	67,5	-	3120	1115
3,5	302	33	67	-	3050	1085
3,55	293	31	66	-	2910	1055
3,6	286	30	65,5	-	2850	1030
3,65	277	29	65	-	2780	995
3,7	269	28	64,5	-	2720	970
3,75	262	27	64	-	2610	945
3,8	255	26	63,5	-	2550	92
3,85	248	25	63	-	2500	895
3,9	241	24	62,5	100	2400	870
3,95	235	23	62	99	2350	845
4	228	22	61,5	98	2260	825
4,05	223	21	61	97	2210	800
4,1	217	20	60	97	2170	780
4,15	212	19	59,5	96	2130	760
4,2	207	18	59	95	2090	745
4,25	202	16	58	94	2010	720

Окончание табл. П1.5

1	2	3	4	5	8	7
4,3	196	12	57	93	1970	705
4,35	192	11	-	92	1900	690
4,4	187	-	-	91	1860	675
4,45	183	-	-	96	1830	660
4,5	179	-	-	99	1770	640
4,55	174	-	-	87	1740	625
4,6	170	-	-	86	1710	610
4,65	166	-	-	85	1660	600
4,7	163	-	-	84	1620	585
4,75	159	-	-	83	1590	575
4,8	156	-	-	82	1540	56
4,85	153	-	-	81	1520	55
4,9	149	-	-	80	1490	53,5
4,95	146	-	-	78	1470	52,5
5	143	-	-	76	1440	51,0
5,05	140	-	-	76	-	50
5,1	137	-	-	75	-	49,5
5,15	134	-	-	74	-	48,6
5,2	131	-	-	72	-	47
5,25	128	-	-	71	-	46,25
5,3	126	-	-	69	-	45
5,35	124	-	-	69	-	44
5,4	121	-	-	67	-	43,5
5,45	118	-	-	66	-	42,5
5,5	116	-	-	65	-	41,75
5,55	114	-	-	64	-	41,25
5,6	112	-	-	62	-	40,5
5,65	109	-	-	61	-	39
5,7	107	-	-	59	-	38,5
5,75	105	-	-	58	-	38
5,8	103	-	-	57	-	37
5,85	101	-	-	56	-	36,5
5,9	99	-	-	54	-	35,5
5,95	97	-	-	53	-	35
6	96	-	-	52	-	34,5

МАТЕРИАЛЫ ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Сокращения на приводимых рисунках:

- КА - космический аппарат;
- АКА - автоматический космический аппарат;
- ТПЗ - теплозащитное покрытие;
- СА - спускаемый аппарат;
- ДУ - двигательная установка;
- ТДУ - тормозная двигательная установка;
- ХИТ - химический источник тока

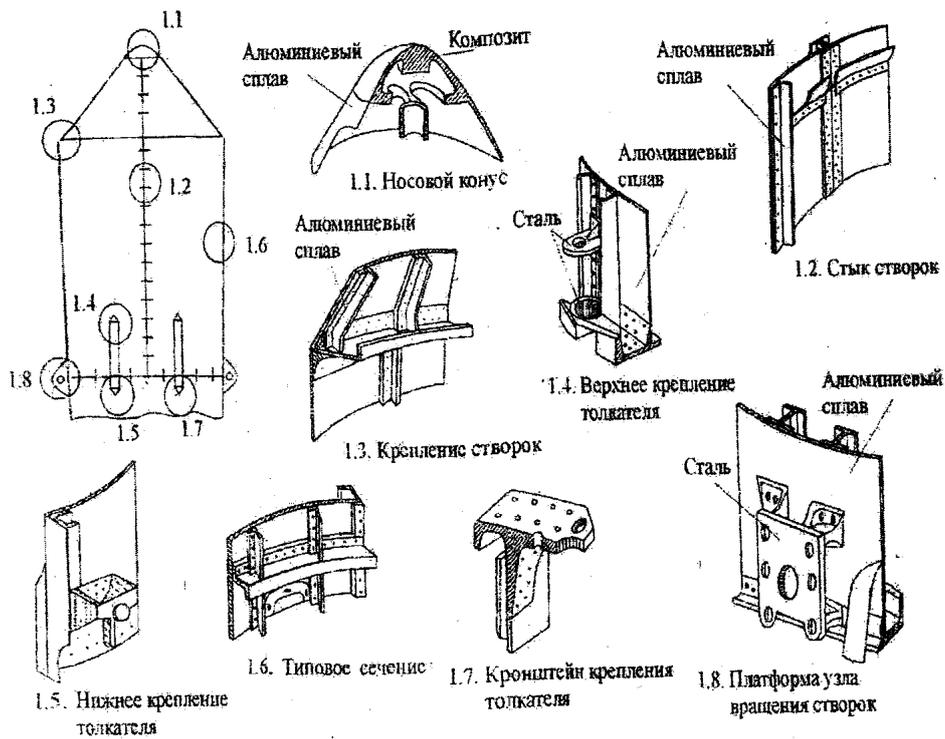


Рис. П2.1. Конструктивно-компоновочная схема КА

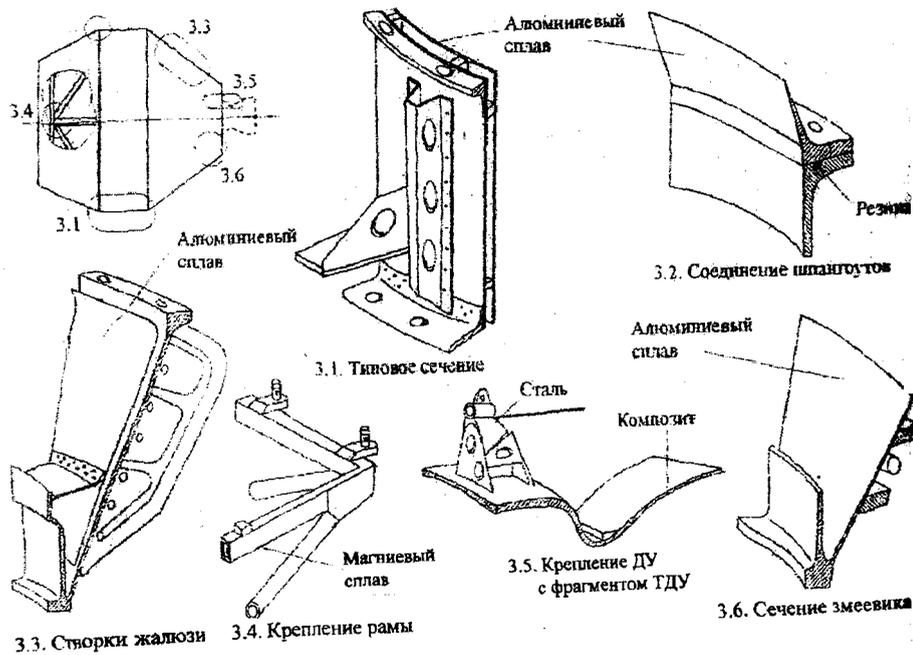
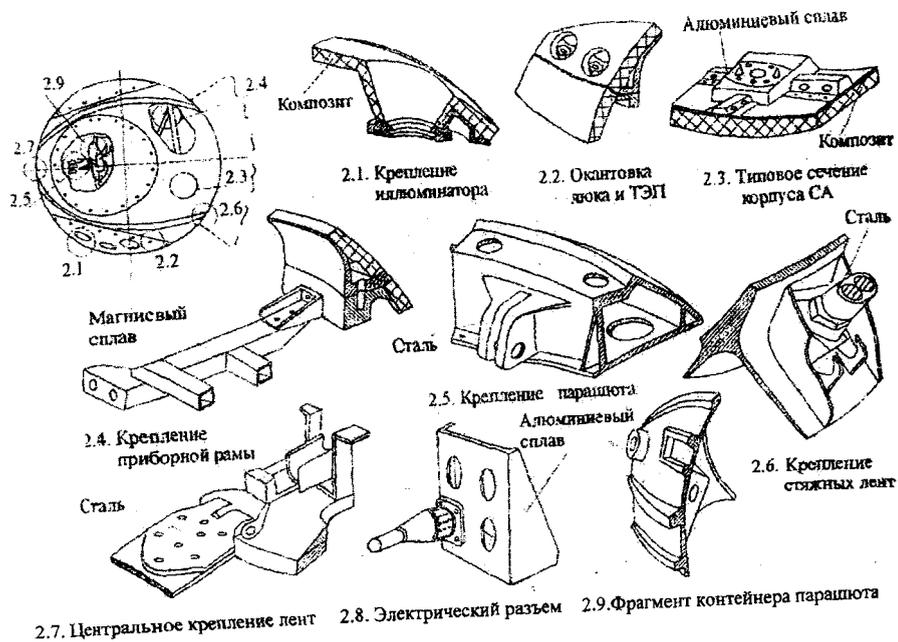


Рис. П2.2. Спускаемый аппарат АКА

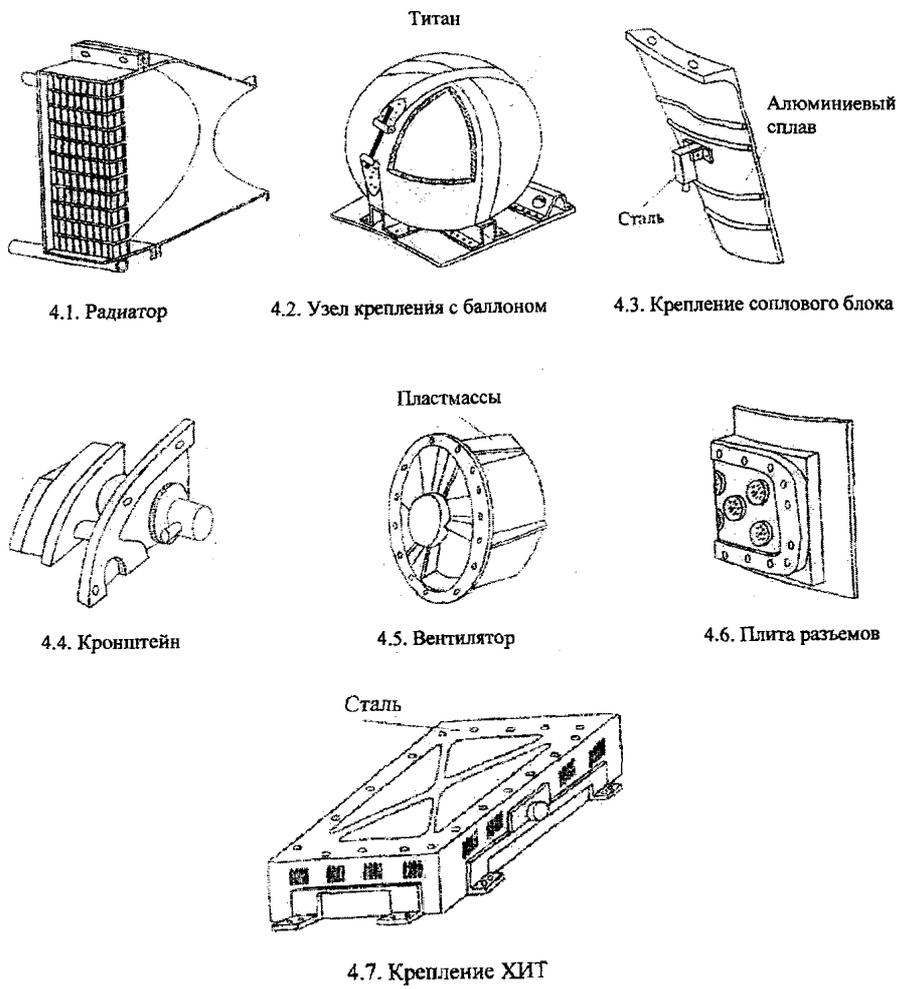


Рис. П2.3. Основные бортовые системы АКА

Учебное издание

ЗАББАРОВ РАХИМ

**МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК И ОТЛИВОК
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Учебное пособие

Редактор Л. Я. Че го да е в а
Доверстка Т. Е. По л о в н е в а

Подписано в печать 25.10.08. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 5,75.
Тираж 100 экз. Заказ . Арт. С-25/2008.

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

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

Группа сплавов	Марка сплава	Массовая доля, % основных компонентов							Сумма учитываемых примесей		
		магния	кремния	марганца	меди	титана	никеля	алюминия	З.В	К	д
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I Al-Si-Mg	AK12 (AL2)	-	10-13	-	-	-	-	Остальное	2,1	2,2	2,7
	AK9Ч (AL4)	0,17-0,30	8-10,5	0,2-0,5	-	-	-	»	1,1	1,4	1,5
	AK7Ч (AL9)	0,2-0,4	6,0-8,0	-	-	-	-	»	1,1	1,5	2,0
	AK8Л (AL34)	0,35-0,55	6,5-8,5	-	-	0,1-0,3	Бериллий 0,15-0,4	»	1,0	1,0	-
II AL-Si-Cu	AK5M (AL5)	0,35-0,6	4,5-5,5	-	1,0-1,5	-	-	»	1,0	1,3	1,7
	AK8M (ALJ32)	0,3-0,5	7,9-9	0,3-0,5	1,0-1,5	0,1-0,3	-	»	0,9	1,0	1,1
	AK8M3Ч (BAL8)	0,2-0,45	7,0-8,5	Цинк 0,5-1,0	2,5-3,5	0,1-0,25	Бор 0,005-0,1	»	0,6	0,6	0,6
	AK5M7 (AL10B)	0,2-0,5	4,5-6,5	-	6,0-8,0	-	-	»	2,7	2,7	3,0
	AK12MMГH (AL3O)	0,8-1,3	11-13	-	0,8-1,5	-	0,8-1,3	»	-	1,1	-
III Al-Cu	AM5 (AL19)	-	-	0,6-1,0	4,5-5,0	0,15-0,35	-	»	0,2	0,3	-
	AM4,5KD (BAL10)	-	-	0,35-0,8	4,5-5,5	0,15-0,35	Кадмий 0,07-0,25	»	0,15	0,15	-
IV Al-Mg	AMr5K (AL13)	4,5-5,5	0,8-1,3	0,1-0,4	-	-	-	»	0,6	0,6	1,8
	AMr5Mц (AL28)	4,8-6,3	-	0,4-0,1	-	-	-	»	0,5	0,6	0,7
	AMr6Л (AL23)	6,0-7,0	Цирконий 0,05-0,20	Бериллий 0,02-0,10	-	0,05-0,15	-	»	0,20	0,20	-
	AMr10 (AL27)	9,5-10,5	Цирконий 0,05-0,20	Бериллий 0,05-0,15	-	0,05-0,15	-	»	0,20	0,20	0,20
	AMr11 (AL22)	10,5-13,0	0,8-1,2	-	-	0,05-0,15	Бериллий 0,003-0,007	»	0,5	1,0	1,2
	AMr6ПЧ (AL23-1)	6,0-7,0	Цирконий 0,05-0,20	Бериллий 0,02-0,10	-	0,05-0,15	-	»	0,05	0,05	-
	AMr10Ч (AL27-1)	9,5-10,5	-	-	-	0,05-0,15	-	»	0,2	0,2	0,9
V Al- прочие компо- ненты	AK7Ц9 (AL11)	0,1-0,3	6,0-8,0	Цинк 7,0-12,0	-	-	-	»	17	1,9	2,5
	ALц4Mг (AL24)	1,5-2,0	Хром 0,2-0,5	0,2-0,5	Цинк 3,5-4,5	0,1-0,2	-	»	0,9	-	-

Группа сплава	Марка сплава	Вид термообработки	Степень нагрева	Закалка			Искусственное старение		
				температура нагрева, °C	время выдержки, ч	охлаждающая среда	температура нагрева, °C	время выдержки, ч	охлаждающая среда
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	AK12 (AL2)	T2	-	-	-	-	370...380	2...4	воздух
		T2	-	-	-	-	260...300	2...4	»
		T2	-	-	-	-	180...220	2...4	»
	AK9Ч (AL4)	T1	-	-	-	-	175±5	5...17	-
		T6	-	535±5	30...40 мин	вода до 50...100°C	175±5	8...10	»
		T6	-	535±5	то же	то же	195±5	30 мин	вода до 50...10°C
	AK7Ч (AL9)	T2	-	-	-	-	370...380	2...4	воздух
		T4	-	535±5	6...8	вода	-	-	-
		T5	-	535±5	30...40 мин	20...60°C	175±5	8	воздух
		T6	-	535±5	2...6	то же	22±5	3...5	»
AK8Л (AL34)	T2	-	535±5	10...16	вода	175±5	-	-	
	T4	-	535±5	10...16	20...100°C	175±5	6	воздух	
II	AK5M (AL5)	T1	-	-	-	-	180±5	5...10	»
		T6	-	525±5	3...5	вода	180±5	5...10	»
		T7	-	525±5	3...5	20...100°C	230±5	3...5	»
AK12M2MгH (AL25)	T1	-	-	-	-	230±10	10...15	»	

	AK12MMrH (АЛ30)	T1	-	-	-	-	200±5	10...15	»
	AK8M (АЛ32)	T6	-	505±5	2...3	вода 20...100°C	175±5	8	»
	AK5M7 (АЛ10В)	T1	-	-	-	-	180±5	3...5	»
III	AM5 (АЛ19)	T4	-	545+3	10...15	вода	-	-	-
		T6		530+3	5...9	20...100°C	175±5	3...6	воздух
		T6		545±3	5...9	вода	175±5	3...6	»
		T7	-	545±3	10...13	80...100°C	250+10	3...10	»
IV	AMr6Л (АЛ23)	T4	-	435±5	20	вода	-	-	-
		T4		435+5	4	80...100°C	-	-	-
		T4		460+5	4	то же	-	-	-
	AMr10 (АЛ27)	T4	-	435+5	20	вода	-	-	-
		T4		435±5	4	90...100°C	-	-	-
		T4		460±5	4	вода	-	-	-
V	АЦ4Mr (АЛ24)	T1	-	-	-	вода 100°C	220+5	8...10	воздух
		T5	-	580+5	4...6	или воздух	120±5	8...10	»

Марка стали	Плот- ность кг/м³	Коэффициент термического линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, 1/град при температуре, °C										Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м град при температуре, °C										
		20	20	20	20...	20...	20...	100	200	300	400	500	600	25	100	200	300	400	500	600	700	800
		100	200	300	400	500	600	200	300	400	500	600	700									
X18H9БЛ	7850	16,5	16,9	17,1	17,4	17,6	17,7	17,7	17,7	18,1	18,3	18,6	19,0	17	-	-	-	-	22,2	23,9	25,1	-
ВНЛ1	7800	12,5	12,7	13,4	14,0	14,5	-	13,2	14,9	15,8	16,3	-	-	18	18,8	20,5	22,2	23,9	25,1	27,6	29,3	-
ВНЛ3	7800	11,2	11,8	12,3	12,6	13,0	13,3	12,4	13,2	13,8	14,6	14,5	-	16	17,2	18,4	20,1	21,3	22,6	24,3	25,5	-
ВНЛ3	7800	10,6	10,9	11,2	11,8	11,9	-	11,2	11,9	12,5	13,1	-	-	18	18,4	19,7	20,5	21,8	23,4	25,1	26,4	-
ЭИ268Л	7800	10,3	10,7	11,1	11,3	11,7	-	11,2	11,7	12,2	12,9	-	-	18,0	19,6	21,4	22,6	24,7	26,4	27,6	28,4	29,7
ВНЛ4	7700	13,6	14,1	14,4	14,7	15,0	-	14,4	15,0	15,5	16,3	17,1	-	13,4	14,6	15,9	17,2	18,8	20,9	-	-	-
В1-Ш5	7680	10,5	10,5	10,8	11,1	11,4	-	10,8	11,4	12,0	12,4	-	-	-	17,1	18,8	20,8	22,1	23,4	25,1	25,9	28,05
ВНЛ6	7980	11,5	11,9	12,2	12,4	12,6	-	12,2	12,9	13,3	13,3	-	-	15,9	17,2	19,3	20,9	22,2	23,4	24,7	26,0	-
ЭИ654Л	7670	16,3	16,4	17,1	17,7	18,3	18,7	18,5	18,5	19,6	20,4	21,2	21,0	10,0	11,3	13,0	14,2	15,9	17,2	18,8	20,5	23,0
ЭИ481Л	7850	-	-	-	-	-	-	18,3	-	-	21,6	-	-	15,1	-	-	18,9	-	-	23,9	-	-
ВЖЛ10	8080	13,8	-	-	-	16,2	-	-	-	-	18,5	-	-	13,0	-	-	-	-	19,3	-	-	-
1Х13Л	7740	11,0	-	-	-	12,0	-	11,6	12,4	12,9	13,5	13,8	14,1	-	25,1	26,0	26,8	28,1	28,9	-	-	-
X13H3BФЛ	7800	11,6	12,0	12,4	12,8	-	-	12,5	13,3	14,0	-	-	-	19,7	-	22,3	-	24,8	-	26,9	-	-
X17H3CЛ	7800	-	11,0	-	-	-	-	-	13,6	-	15,1	-	-	19,7	-	21,4	-	24,8	-	27,7	-	-
X24H81M2Д3 л (ВКЛ1)	7850	12,9	13,4	13,8	14,2	14,6	-	13,9	14,5	15,7	-	-	-	13,8	15,1	16,7	18,0	19,7	20,9	-	-	-

Марка стали	Плотность, кг/м ³	Коэффициент термического линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, 1/град, при температуре, °С												Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м град), при температуре, °С								
		20	20	20	20...	20...	20...	100	200	300	400	500	600	25	100	200	300	400	500	600	700	800
		100	200	300	400	500	600	... 200	... 300	... 400	... 500	... 600	... 700									
Х18Н9БЛ	7850	16,5	16,9	17,1	17,4	17,6	17,7	17,2	17,7	18,1	18,3	18,6	19,0	17	-	-	-	-	22,2	23,9	25,1	-
ВНЛ1	7800	12,5	12,7	13,4	14,0	14,5	-	13,2	14,9	15,8	16,3	-	-	18	18,8	20,5	22,2	23,9	25,1	27,6	29,3	-
ВНЛ3	7800	11,2	11,8	12,3	12,6	13,0	13,3	12,4	13,2	13,8	14,6	14,5	-	16	17,2	18,4	20,1	21,3	22,6	24,3	25,5	-
ВНЛ3	7800	10,6	10,9	11,2	11,8	11,9	-	11,2	11,9	12,5	13,1	-	-	18	18,4	19,7	20,5	21,8	23,4	25,1	26,4	-
ЭИ268Л	7800	10,3	10,7	11,1	11,35	11,7	-	11,2	11,7	12,2	12,9	-	-	18,0	19,6	21,4	22,6	24,7	26,4	27,6	28,4	29,7
ВНЛ4	7700	13,6	14,1	14,4	14,7	15,0	-	14,4	15,0	15,5	16,3	17,1	-	13,4	14,6	15,9	17,2	18,8	20,9	-	-	-
В1-Ш5	7680	10,5	10,5	10,8	11,1	11,4	-	10,8	11,4	12,0	12,4	-	-	-	17,16	18,84	20,83	22,19	23,44	25,12	25,95	28,05
ВНЛ6	7980	11,5	11,9	12,2	12,4	12,6	-	12,2	12,9	13,1	13,3	-	-	15,9	17,2	19,3	20,9	22,2	23,4	24,7	26,0	-
ЭИ654Л	7670	16,3	16,4	17,1	17,7	18,3	18,75	16,5	18,5	19,6	20,4	21,2	21,0	10,0	11,3	13,0	14,2	15,9	17,2	18,8	20,5	23,0
ЭИ481Л	7850	-	-	-	-	-	-	18,3			21,6	-	-	15,1	-	-	18,9	-	-	23,9	-	-
ВЖЛ10	8080	13,8	-	-	-	16,2	-				18,5	-	-	13,0	-	-	-	-	19,3	-	-	-
1Х13Л	7740	11,0	-	-	-	12,0	-	11,6	12,4	12,9	13,5	13,8	14,1	-	25,1	26,0	26,8	28,1	28,9	-	-	-
Х13Н3ВФЛ	7800	11,6	12,0	12,4	12,8	-	-	12,5	13,3	14,0		-	-	19,7	-	22,3	-	24,8	-	26,9	-	-
Х17Н3СЛ	7800	-	11,0	-	-	-	-		13,6		15,1	-	-	19,7	-	21,4	-	24,8	-	27,7	-	-
Х24Н81М2Д3Л (ВКЛ1)	7850	12,9	13,4	13,8	14,2	14,6	-	13,9	14,5	15,7	16,0	-	-	13,8	15,1	16,7	18,0	19,7	20,9	-	-	-