

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

Р. Заббаров

ОСНОВЫ ПЛАВКИ И ЛИТЬЯ МЕТАЛЛОВ

Под редакцией доктора технических наук,
профессора Ф.В. Гречникова

Допущено учебно-методическим объединением по образованию в области металлургии в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Обработка металлов давлением»

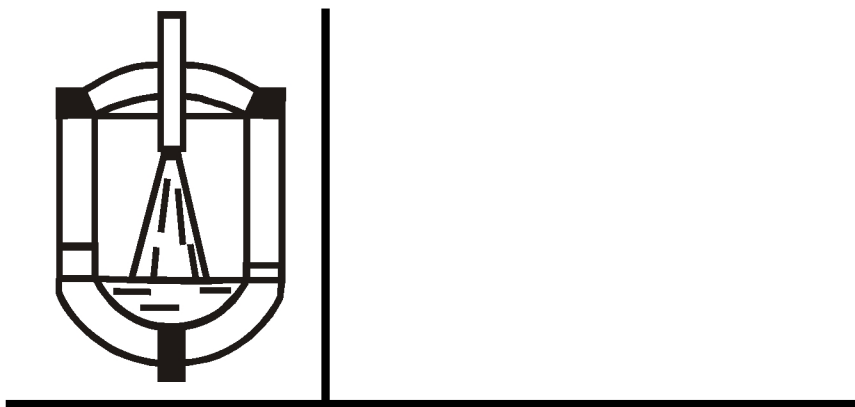
САМАРА 2006

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

Р. Заббаров

ОСНОВЫ ПЛАВКИ И ЛИТЬЯ МЕТАЛЛОВ

САМАРА
2006



Р. Заббаров

ОСНОВЫ ПЛАВКИ И ЛИТЬЯ МЕТАЛЛОВ

САМАРА 2006

УДК 621.74:629.7(075.8)
ББК 3461
3 121

Рецензенты:

чл.-корр. РАН, проф. В. А. Б а р в и н о к,
д-р техн. наук, проф. В. А. К о с т ы ш е в

Заббаров, Р.

3 121 **Основы плавки и литья металлов:** учеб. пособие / *Р. Заббаров*; Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Самара, 2006. 170 с.: ил.

ISBN 5-7883-0349-4

Приведены основные сведения по истории металлургии, принятые стандартами 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). Выполнено на кафедре "Технология металлов и авиаматериаловедение".

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета.

УДК 621.74:629.7(075.8)
ББК 3461

ISBN 5-7883-0349-4

© Заббаров, Р., 2006
© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	5
Принятые сокращения и обозначения.....	7
1. ИЗ ИСТОРИИ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛООБРАБОТКИ.....	9
1.1. Открытие металлов и их соединений, распространенность, некоторые свойства.....	9
1.2. От железа к стали.....	18
1.3. Становление и развитие процессов ОМД.....	20
2. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ТЕРМИНЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	24
2.1. Металлы и сплавы.....	24
2.2. Установки, печи, агрегаты.....	27
2.3. Способы получения металлов и сплавов.....	29
2.4. Литейное производство.....	33
2.5. Металлография, термическая обработка.....	38
3. ШИХТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	50
4. ЛИТЕЙНЫЕ СПЛАВЫ.....	53
4.1. Алюминиевые сплавы.....	53
4.2. Магниевого сплавы.....	63
4.3. Титановые сплавы.....	71
4.4. Никелевые жаропрочные сплавы.....	76
4.5. Стали.....	80
5. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ.....	90
5.1. Плавка в вакууме.....	90
5.2. Обработка расплавов.....	99
5.3. Переплавные процессы.....	101
5.4. Внепечная обработка.....	106
6. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАВКИ И ЛИТЬЯ.....	107
6.1. Выбор состава сталей и сплавов.....	107

6.2. Общая характеристика и отечественная классификация отливок.....	107
6.3. Способы литья.....	110
6.4. Принципы разработки технологии плавки.....	116
7. ПЛАВКА И ЛИТЬЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ.....	117
7.1. Особенности плавки алюминиевых сплавов.....	117
7.2. Особенности технологии фасонного литья алюминиевых сплавов.....	119
7.3. Производство алюминиевых слитков.....	121
8. ПЛАВКА И ЛИТЬЕ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ.....	127
8.1. Особенности плавки магниевых сплавов.....	127
8.2. Особенности технологии фасонного литья магниевых сплавов.....	129
8.3. Производство слитков из магниевых сплавов.....	131
9. ПЛАВКА И ЛИТЬЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ.....	132
9.1. Особенности плавки титановых сплавов.....	132
9.2. Особенности технологии фасонного литья титановых сплавов.....	134
9.3. Производство титановых слитков.....	138
10. ПЛАВКА И ЛИТЬЕ СТАЛЕЙ И ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ.....	142
10.1. Особенности плавки и литья никелевых сплавов и сталей..	142
10.2. Изготовление лопаток ГТД.....	143
10.3. Изготовление литого деформирующего инструмента.....	153
11. ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОТЛИВОК.....	157
Библиографический список.....	161
Приложение 1.....	163
Приложение 2.....	167

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 приведены некоторые исторические аспекты открытия металлов и их соединений, выплавки, литья и процессов ОМД.

В главе 2 рассмотрены основные определения и термины металлургического производства: металлы и сплавы, печи, способы получения металлов и сплавов, литейное производство.

В главе 3 рассмотрена сырьевая база металлургии, в частности шихтовые материалы при выплавке сталей и сплавов, методы расчета шихты.

В главе 4 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 5 рассмотрены физико-химические процессы получения сплавов (процессы при плавке в вакууме, обработка расплавов вакуумом, инертными газами и порошкообразными материалами, переплавные процессы и внепечная обработка расплавов).

Глава 6 посвящена основам технологии плавки и литья (выбор сплавов и сталей для литья и общие понятия о сплавах и шихтовых материалах, характеристика и классификация отливок, способы литья и принципы разработки технологии плавки).

В главах 7-10 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.

Термическая обработка изделий из различных сплавов в отдельный раздел пособия не выделено, т.к. конкретные режимы термической обработки изделий приведены в соответствующих разделах пособия. Теория 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 и уменьшению толщины стенок отливок. Освоение технологии крупногабаритного литья выявило определенные проблемы. Необходимый уровень плотности отливок достигается в основном за счет увеличения технологических напусков, разветвленности к снижению эффективности методов литья, анизотропии структуры и свойств заготовок.

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. В связи с этим в разд. 10.1 и 10.2 рассмотрены технологические процессы изготовления рабочих лопаток ГТД и литого деформирующего инструмента. В главе 11 приведены основы конструирования отливок при литье в песчаные формы.

Учебное пособие завершается библиографическим списком и приложениями.

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	$\sigma_{\text{пц}}$	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 (H)	HRC		
Удельная ударная вязкость при изгибе	KCU	кгс/мм ²	1 кгс/см ² = 9,8 кДж/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 кг/см ³ = 10 кг/м ³
Коэффициент термического линейного расширения	α	1/°C	1/K = 1/град
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 магниевых 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. ИЗ ИСТОРИИ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛООБРАБОТКИ

1.1. Открытие металлов и их соединений, распространенность, некоторые свойства

Очередность открытия элемента зависит от химической активности и распространенности. На ранних ступенях цивилизации определяющей являлась их активность, на поздних – их распространенность. Первыми в ряду открытий находятся твердые самородные неметаллы (углерод и сера), за ними самородные металлы (медь, золото), далее легкоплавкие металлы (свинец, олово, ртуть и др.). В научный период очередность открытия элементов определялась главным образом их распространенностью. Распространенность элементов определяют числом *Кларка* ("кларки") от имени английского ученого. "*Кларк*" – это среднее содержание элементов в земной коре (процент по массе) на глубину до 16 км и в атмосфере на высоте до 15 км. В табл. 1 приведены сведения об очередности открытия, их распространенности, некоторых свойствах элементов, применении в различных отраслях науки и техники [1, 2].

До 1869 года было известно 63 элемента. При этом только у 48 элементов были надежно установлены атомные веса. У других элементов атомные веса были неточными или совсем неверны. Д. И. Менделеев расположил все элементы в ряд по возрастанию их атомных весов. 1 марта 1869 г. Д.И. Менделеев опубликовал работу "Опыт системы элементов, основанной на их атомном весе и химическом сходстве". Этот день считается днем открытия периодического закона.

Углерод (от лат. Carboneum – уголь), химический символ С, занимает первое место по очередности открытия, а по распространенности в земной коре ("*Кларку*") одиннадцатое место. Встречается в природе в свободном состоянии (уголь, графит, алмаз) и в соединениях (карбиды, газы СО, СО₂ и др.), а также искусственно полученных карбонилах и многих органических материалах.

На основе углерода построено все живое на Земле. Трудно перечислить все области применения углерода. Назовем только несколько из них.

Таблица 1

Некоторые сведения о химических элементах

Элемент	Очередность открытия	Кларк (Место)	Некоторые свойства		
			Плотность, кг/м ³	Т-ра плавления, °С	Т-ра кипения, °С
C	1	11	3510 (алмаз)	>3500 °С при давл.>105 атм.	4830 в тех же усл.
S	2	14	2070	119,5	444,6
Au	3	75	19320	1063	2966
Cu	5	23	8960	1083	
Fe	6	4	7874	1535	3000
Pb	7	34	11340	327,4	1744
Sn	8	30	7290 (бел. олово)	231,9	2270
Hg	9	69	113546	-38,87	356,9
Zn	10	28	7140	419,5	907
Sb	12	64	6684	630,5	1380
Bi	13	66	9800	271,3	1560
P	15	12	1820 (бел, фосфор)	44,2	280
H	16	10	0,0899	-259,2	-252,7
Ca	19	5	1550	850	1490
Si	20	2	2330	1410	2355
Co	21	27	8900	1493	2900
Ni	22	25	8900	1455	2730
Al	23	3	2702	660,2	2400
Mg	24	8	1738	650	1107
N	25	24	1,2506	-209,86	-195,8
O	26	1	1,429	-218,8	-182,97
Mn	27	12	7400	1245	2097
Mo	29	51	10220	2610	5560
W	31	43	19300	3400	5900
Ti	37	9	4500	1875	3260
Zr	38	21	6400	1852	4000
Cr	40	20	7190	1900	2500
Be	41	44	1848	1278	2970
V	42	22	6100	1890	3000
Nb	43	36	8570	2468	4930
Li	51	26	534	180,5	1326

Металлургия. Углерод – главный легирующий элемент всех углеродистых сталей и чугунов, входит в состав легированных сталей и сплавов. Без углерода невозможно получить чугун (доменный процесс), чистое железо, алюминий и многие цветные металлы. Кокс, содержащий (97-98) % С, – главное топливо и восстановитель в доменных печах.

Теплоэнергетика. Уголь, нефть, горючие сланцы, торф, природный газ – основа теплоэнергетики.

Производство алмазов. Во всем мире широко применяют искусственные алмазы, получаемые из графита под давлением порядка 100 тыс. атм. и при температуре 2600 °С. Эти алмазы идут как для производственных (металлообработка), так и для ювелирных целей.

Органическая химия – это химия углеводородов и их производных. Сейчас известны миллионы органических соединений, т.е. соединений углерода (на долю остальных элементов приходится только около ста тысяч соединений).

Медь (от лат. Cuprum, происходит, вероятно, от слова "смида" – так называли древние племена, населявшие европейскую часть территории нашей страны, или от названия острова Кипр, где добывали медь), химический символ Cu. Занимает пятое место по открытию и 23-е по "кларку".

У меди не очень высокие механические свойства. Но оружейников средневековья эти свойства меди устраивали. Отсюда медные щиты, бронзовые пушки и др. оружие. *Бронза и медь* сыграли выдающуюся роль в изобразительном искусстве – скульптуры, гравюры, барельефы и т.п.

Медь – один из самых важных древних и популярных металлов. Медь популярна не только в среде инженеров (конструкторов, электриков, машиностроителей), но и у гуманитарных профессий (историков, скульпторов). Как конструкционный материал медь широко используется и сейчас в виде медных сплавов – бронз и латуней. Первоначально под бронзой понимали сплавы с оловом. В настоящее время кроме оловянных бронз широко применяют алюминиевые, кремнистые, бериллиевые и др. Бронзы идут на изготовление в основном методами литья вкладышей, сальников, клапанов и т.п. деталей. Художественная бронза (около 5 % Sn, 10 % Zn и 3 % Pb) применяется для скульптурного литья.

Латунь – это сплав меди с цинком и различными добавками (Al, Fe, Pb и др.). Для латуни характерна высокая пластичность, по-

этому она хорошо обрабатывается давлением (ОМД). Укажем только одну область применения латуней – это гильзы патронов и снарядов. Кроме того, во взрывоопасных цехах пользуются латунным инструментом (не "искрит").

Но главная ценность меди – высокая тепло- и электропроводность. По этому свойству медь уступает только серебру. Поэтому главным потребителем меди является электротехническая промышленность. Медь идет также при изготовлении вакуумных устройств, котлов, холодильников, змеевиков.

Железо (от санскритских слов "джальджа" – металл, руда или "жель" – блистать, пылать), химический символ Fe (Ferrum), основа большинства чугунов, сталей, сплавов, ферросплавов и технического железа. На долю железа и его сплавов приходится более 90% всех выплавляемых металлов.

Кальций (от лат. Calx, т.е. calcis – известь), химический символ Ca; применяется в металлургии как раскислитель сталей и цветных сплавов, входит в состав антифрикционных материалов. В природе встречается в виде соединений: карбонат кальция CaCO_3 – известняк, мел, мрамор; сульфат кальция $\text{CaSO}_4 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ – гипс, алебастр; фосфорно-кислый кальций; хлористый кальций; фтористый кальций CaF_2 – плавиковый шпат. Ниже рассмотрены отрасли их применения.

Карбонат кальция CaCO_3 – самый важный из минералов на основе CaCO_3 – известняк. Больше всего известняка идет на нужды химической промышленности. Он незаменим при производстве цемента, карбида кальция, соды, всех видов извести (гашеной, негашеной, хлорной) и многих др. веществ. Большое количество известняка идет в металлургии в качестве флюсов. Без него невозможно любое строительство, в т.ч. дорог (щебенка).

Разновидность CaCO_3 – мел. Мел применяют в резиновой и бумажной промышленности, в строительстве. Мел – это зубной порошок, школьные мелки и многое другое. Разновидностью CaCO_3 является также *мрамор*.

Сульфат кальция CaSO_4 . Самый известный минерал *гипс* $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ – это *алебастр*.

Кальций фосфорно-кислый – кальциевая соль ортофосфорной кислоты. Это основной компонент фосфоритов и апатитов – сырья для производства фосфорных удобрений и др. химических продук-

тов. Такое соединение как $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ – основной материал наших костей.

Хлористый кальций CaCl_2 – очень гигроскопичен, поэтому он широко применяется для сушки жидкостей и газов. Кроме того, CaCl_2 применяют в медицине.

Фтористый кальций CaF_2 (плавиковый шпат) широко применяют в металлургии в качестве флюса.

Кремний (от лат. *Silicium*, от слова *silex* – кремнь), химический символ *Si*, второй после кислорода элемент по распространенности на Земле. Элемент был открыт шведским химиком и минералогом И.Я. Берцелиусом в 1825 г.

Во всех природных соединениях кремний связан с кислородом. На долю кремнезема SiO_2 приходится около 12% массы земной коры. 75 % земной коры составляют силикаты и алюмосиликаты.

В состав почти всех стекол входит SiO_2 : в нормальном стекле – 75,3% SiO_2 , в бутылочном – 73%, оконном – 72%, электроламповом – 69,4%, в высокопрочном стекле ("пирекс") – 80,9%.

Самый распространенный клей – силикатный, растворимое стекло (Na_2SiO_3).

Кремний широко применяется в металлургии. Сплав кремния с железом – ферросилиций – используют для приготовления сталей и сплавов, а также кислотоупорных изделий. Искусственно получаемое соединение SiC – карборунд, по твердости он уступает только алмазу. Без кремния невозможно изготовить современные солнечные батареи.

Никель (от названия минерала *Kupfernickel*, т.е. от нем. *Kupfer* – медь и *Nickel* – злой дух, мешавший получению меди), химический символ *Ni*. Элемент был открыт в 1751 г. шведским металлургом А.Ф. Кронстедтом.

Наиболее широкое применение получил никель для производства металлических сплавов. Сейчас промышленность использует несколько тысяч сплавов, в состав которых входит никель. Рассмотрим некоторые из них.

Впервые стали применять медно-никелевые сплавы (в природе распространены медно-никелевые руды и первое название элемента №28 "купферникель"). *Ni* обладает "отбеливающей" способностью – уже 20% *Ni* полностью гасят красный цвет меди. Так получили "новое серебро", т.е. *нейзильбер* (сплав меди с 5-35% *Ni* и 13-45% *Zn*). Родственник нейзильбера – *мельхиор* (сплав меди с 5-30% *Ni*, добав-

ки 0,8% Fe и 1% Mn). Сначала нейзильбер завоевал популярность у ювелиров (например, столовое серебро). Затем его стали широко применять для изготовления монет. А в природе встречается "натуральный" сплав никеля – *монель-металл* (60-70% Ni и 28-30% Cu). Его получают из медно-никелевых руд, не разделяя медь и никель. Монель-металл – один из главных сплавов химического машиностроения.

Почти половина Ni идет на изготовление конструкционных, нержавеющих, жаропрочных, жаростойких, магнитных и других сталей и сплавов со специальными свойствами. Так, *инконель* – это сплав на основе Ni-Cr с различными добавками Al, Ti и др. элементов. Инконель – один из главных материалов ракетной техники. *Нихром* (20% Cr, 80% Ni) – основа большинства электронагревательных приборов. *Элинвар* – (45% Ni, 55% Fe) сохраняет постоянную упругость при различных температурах. *Пермаллой* (Fe Ni₃) – сплав с феноменальной магнитной проницаемостью (для техники слабых токов – телефонные устройства, вычислительные машины и т.п.).

Алюминий (от лат. *Alumen* – квасцы), химический символ Al. Алюминий – второй металл после железа и третий элемент по распространенности после кислорода и кремния. Впервые металлический алюминий в 1825 г. получил датский физик Г.Х. Эрстед. Алюминий и алюминидовые сплавы применяются в машиностроении, строительстве, металлургии, электротехнической промышленности и других отраслях.

Алюминий по значимости – второй после железа металл. Для алюминия характерны малая плотность, высокая тепло- и электропроводность, хорошая пластичность. Из-за низкой прочности алюминий как конструкционный материал не применяется. Повышение прочности алюминидовых сплавов начал решать немец Альфред Вильм. Он установил, что если вводить в алюминий медь и магний, то его прочность можно повысить в 3-5 раз. Алюминий технической чистоты имеет предел прочности $\delta_e = 58$ МПа, а сплав Al + 4% Cu уже 200 МПа. Но и этого недостаточно. А что если закалить сплав? Вильм нагревал сплав до 500°C, а затем охлаждал в воде. При этом у свежезакаленного сплава прочность несколько повысилась (250 МПа). Было установлено, что чем дольше "отлеживался" закаленный сплав, тем больше повышалась прочность и достигала 400 МПа. Таким образом определилась технология упрочнения алюминия: леги-

рование, закалка и выдержка после закалки (старение). Вильм продал свой патент одной немецкой фирме, которая стала выпускать этот сплав и назвала его "дуралюмин" (твердый алюминий). На русском языке это дюралюминий или просто дюраль. После этого алюминий стал главным летающим металлом. В настоящее время разработано огромное количество алюминиевых сплавов. Al – это самолеты, ракеты, двигатели, спутники.

Но алюминий применяется не только как летающий металл. Американские ученые составили список изделий из алюминия. В этом списке оказалось более 2000 названий: это детали автобусов, судов, вагонов, подводных лодок. Из алюминия производят перекрытия, облицовку и оконные рамы высотных зданий, аппаратуру для производства кислот и органики, резервуары, радиаторы, моторные и весельные лодки, электротехнические изделия, посуду и мебель. Из алюминия делают даже оконные занавески. Для этого ткань покрывают тонким слоем алюминия. Если их повернуть металлическим слоем наружу, то они будут пропускать свет, но задерживать тепло (для жаркой погоды). Для холодной погоды надо занавески повернуть слоем вовнутрь.

Магний (от магнезия), химический символ Mg. Загрязненный примесями магний впервые получил в 1808 г. английский химик Хэмфри Деви, а чистый магний получен в 1829 г. А. Бюсси. Магний и его сплавы применяют в производстве сверхлегких сплавов, химической и металлургической технологиях.

Магний легче меди в 5 раз, железа в 4,5 раза, алюминия в 1,5 раза. Магний легко отнимает кислород и хлор у многих элементов, не боится щелочей, соды, керосина, бензина и минеральных масел. Он, однако, не выносит морской и минеральной воды и растворяется в них. Не реагируя на холодную воду, Mg энергично вытесняет водород из горячей воды. Если нагреть Mg до 55 °С, он вспыхивает и мгновенно сгорает.

Существенный недостаток магния – низкая прочность. Поэтому как конструкционный материал Mg не применяют, а используют магниевые сплавы (Mg+Al, Zn, Mn и др. элементы). Авиация и реактивная техника, ядерные реакторы, детали двигателей, баки для бензина и масла, приборы, корпуса вагонов, автобусов, автомобилей, колеса, масляные насосы, отбойные молотки, пневмобуры, фото- и киноаппараты, бинокли – вот далеко не полный перечень области

применения магниевых сплавов. Большое значение имеет магний в металлургии при производстве V, Cr, Ti, Zr. Если Mg ввести в чугун, то можно существенно повысить его прочность. Свойство Mg "гореть" используют для изготовления осветительных и сигнальных ракет, трассирующих пуль, снарядов и зажигательных бомб.

Титан (от греч. Titanes – титаны, в греческой мифологии – дети Урана (Неба) и Геи (Земли)). Химический символ Ti. До 1795 г. элемент № 22 называли "менакином". Так назвал его английский химик Уильям Грегор, который открыл этот элемент в минерале "менакините" (сейчас это минерал "ильменит"). Немецкий химик Мартин Клапрот открыл новый элемент в другом минерале – рутиле и назвал его "титаном". Таким образом, Грегор и Клапрот открыли один и тот же элемент, но ни тот, ни другой не получили чистый титан. В действительности чистый титан был получен в 1875 г. русским ученым Д. К. Корниловым. Титан и его сплавы широко применяют в авиации, химической промышленности, судостроении, ракетостроении и других отраслях.

Особенность титана состоит в том, что малейшие примеси резко ухудшают его свойства, придавая ему хрупкость. Поэтому он был не пригоден для дальнейшей обработки и соединения титана получили применение раньше, чем сам Ti и его сплавы. Например, $TiCl_4$ использовался для создания дымовых завес.

Титан почти вдвое тяжелее Al, но зато в 6 раз прочнее его. Ti – тугоплавкий металл ($t_{пл} = 1680\text{ }^{\circ}\text{C}$), поэтому он может применяться при работе деталей в области более высоких температур, чем сталь. Например, при полетах со сверхзвуковыми скоростями от трения о воздух развиваются такие температуры, которые не выдерживают ни стали, ни, тем более, алюминиевые сплавы. Ti и его сплавы позволили достичь скорости летательных аппаратов (ЛА), в 2-3 раза превышающей скорость звука. Поэтому титановые сплавы нашли применение в авиации, ракетной технике и космонавтике.

Титан прочен, химически стоек. При этом в морской воде днища судов не обрастают ракушками. Поэтому Ti – лучший материал для судов и подводных лодок.

Благодаря уникальной стойкости, Ti широко применяется в химическом и нефтяном машиностроении, фармацевтической, микробиологической и пищевой промышленности, медицине и др. отраслях. Ti применяется также в металлургии.

Молибден (от лат. Molybdaena). Этим словом обозначали все минералы, которые оставляли след на бумаге (графит, свинец, PbS, молибден), т.е. писали. Это латинское слово происходит от древнегреческого "μόλυβδος", т.е. свинец. Химический символ Mo. Первооткрывателем молибдена является шведский химик Карл Вильгельм Шееле. Он открыл элемент №42 в 1790 г. Основное применение молибден нашел в металлургии при производстве сталей и сплавов.

Прежде всего Mo вторгся в металлургию для производства стали как легирующий элемент. Всего 0,3% Mo повышают твердость стали, как и 1% W. Таким образом, Mo наряду с Cr, Ni, Co нашел широкое применение как легирующий элемент, причем сталь легируют не чистым молибденом, а более дешевым ферромolibденом.

Из хромомolibденовой стали изготавливают тонкостенные трубы для изготовления каркасов ЛА. Хромо- и никель-мolibденовые стали используются для изготовления оружейных стволов, бронебойных снарядов, судовых валов, винтовочных отвалов. 90% всего Mo использует металлургия. Молибден применяется в электротехнической и вакуумной технике. Но особое место занимает Mo в создании высокотемпературных материалов для ЛА.

Вольфрам (от нем. Wolf – волк и Ramm – баран, т.е. в целом означает "волчьи повадки"). При этом под "вольфрамом" понимался не сам металл, а минерал "вольфрамит". Считалось, что эта руда содержит олово. Но при выплавке олова практически не было, словно кто-то его "пожирал" (волк барана). Впервые металлический вольфрам был получен в последней четверти XVIII века. Химический символ W. Вольфрам широко применяют для легирования сталей, в производстве износостойких и жаропрочных сплавов и других отраслях.

Уникальной твердостью обладают твердые сплавы. Эти сплавы состоят из карбидов и связки. Так, сплавы группы ВК содержат карбиды вольфрама WC от 98 до 92% и кобальтовую связку (остальное). Около 95% W поглощает металлургия для изготовления сталей и сплавов. При этом для легирования обычно используют ферровольфрам. Из вольфрамовой стали изготавливают танковую броню, оболочки торпед и снарядов, детали самолетов и двигателей. Сплав W, Si и Ni идет для изготовления контейнеров, в которых хранят радиоактивные отходы. Применение вольфрамовой нити в электрических лампочках общеизвестно.

1.2. От железа к стали

Металлы у человека появились не вдруг и не в результате какого-то резкого скачка, а входили постепенно в жизнь людей. Обычно принято считать семь "доисторических" металлов: золото (Au), серебро (Ar), медь (Cu), железо (Fe), олово (Sn), свинец (Pb) и ртуть (Hg). Нельзя точно сказать, когда человек начал добывать и обрабатывать металлы (сплавы). Можно предполагать, какой из металлов нашел первое применение. Очевидно, это были металлы "чистого" происхождения (самородные), которые встречаются в природе. В первую очередь это относится к золоту и меди. Но железо тоже может встречаться в "чистом" виде, например в метеоритах. Скорее всего первым металлом было золото. Однако оно не пригодно для приготовления орудий труда и войны, но полученный опыт в работе с ним пригодился в дальнейшем для обработки других металлов.

Потом пришел медный век, а далее бронзовый. Медный век длился около 1000 лет, бронзовый – вдвое больше. Бронзовый век сменился постепенно железным. В Центральной Европе железный век приходится на 1000-450 гг. до нашей эры и продолжает существовать до наших дней. Ниже кратко рассмотрены вопросы получения железа, чугуна и стали с исторической точки зрения [2].

С древнейших времен ковкое (*кричное*) железо получали путем прямого восстановления железной руды. Это так называемый *сыродутный* процесс. Он был широко распространен в XVIII веке. В Европе он сохранился вплоть до 1850г., а в Северной Америке – до 1890 г. В наше время сыродутные (кричные) горны можно встретить в Центральной Африке. Кожух сыродутного горна изготавливался из глины попеременно с деревянными жердями. В рабочее пространство горна загружали слоями уголь и измельченную руду. Через отверстия поступала воздушная тяга. При этом окислы железа восстанавливались. В результате получали *губчатое* или *кричное* (в зависимости от состава руды и температуры процесса) железо.

Чаще всего это была *крица*, т.е. продукт, состоящий из сваренных между собой частиц восстановленного железа ("криц"), находящихся в тестообразном шлаке. Крицу извлекали через пролом в стенке горна и к делу приступал кузнец, проковывали крицу и "выдавливали" шлак. Затем крицу разделяли на части, проковывали и придавали нужную форму.

Со временем стенки сыродутного горна стали выкладывать из кирпича и применять принудительное воздушное дутье (мехи). Так

постепенно *сыродутный горн* преобразовался в *домницу* – прообраз современных *доменных печей*. В этом процессе роль восстановителя (древесного угля) росла. Получаемый железоуглеродистый сплав, насыщенный углеродом, снижал температуру плавления. Так, по ходу развития процесса стали получать два продукта: *железо* (губка, крица) и *чугун*. Чугун был побочным продуктом, свойства которого не были известны. Тогда надо было "решать" проблему чугуна. Поэтому со временем и были разработаны процессы "передела" чугуна в ковкое железо. Основная задача – "выжечь" углерод из чугуна. Этот процесс получил название "*кричный передел*" или "*фришевание*" (от нем. *frisch* – свежий, чистый).

В 1784 г. англичанин Генри Корт предложил способ "*пудлингования*" (от англ. *puddle* – месить, перемешивать). Это было начало металлургии стали. Процесс сводится к очистке чугуна от углерода в пламенной печи. Продукт процесса, железо, в горячем виде проковывали на "колбаски" (диаметром 7-10 см и длиной 50 см). Эти заготовки раскатывали на полосы, затем разделяли на куски длиной 50 см и еще раз прокатывали, накладывая по четыре полосы одна на другую. Получали "*сварочное железо*". Но сварочное железо имело существенный недостаток – неравномерность свойств по сечению. Англичанин Бенджамин Хатсмен (1704-1777 гг.) пришел к выводу, что состав можно выровнять путем переплава.

Однако основателем сталеплавильного производства следует считать англичанина Генри Бессемера (1813-1898 гг.). В 1855 г. он впервые предложил получать сталь из жидкого чугуна, продувая его воздухом.

Для переработки фосфористых чугунов англичанин Сидней Джилкрист Томас (1850-1885 гг.) предложил в 1877 г. продувать жидкий чугун воздухом в конвекторе с основной футеровкой.

Бессемеровский и томасовский процессы позволяли получать сталь из жидкого чугуна. Но эти процессы не предусматривали использования отходов металлообработки (скрап). Немецкие металлурги Вильгельм и Фридрих Сименсы предложили регенеративную печь. В 1864 г. французскому металлургу Пьеру Мартену (1824-1915 гг.) удалось впервые выплавить сталь из отходов в регенеративной печи Сименсов. Этот процесс получил названия: "*мартеновский*" во Франции и России, "*сименс-мартеновский*" в Германии и "*процесс на открытом поду*" в Англии и США.

1.3 Становление и развитие процессов ОМД

Развитие обработки металлов давлением началось сковки самородных металлов и, вероятно, раньше, чем человек научился выплавлять металлы.

Железо, судя по данным раскопок в Египте и в бассейне Тигра и Евфрата, стало известно не позднее 4500 лет до н. э. Первые изделия из метеоритного железа получали ковкой. Греки приписывали изобретенияковки Гефесту – богу огня и покровителю кузнецов.

Следующим по времени освоения процессом обработки металлов давлением было волочение. В III-IV тысячелетии до н. э. в Вавилоне при изготовлении украшений из благородных металлов золота и серебра применяли волочение. Первые волокни были получены из камня. Протягивание проволоки производили вручную. В последующем основным волочильным инструментом была доска с просверленными в ней отверстиями различного диаметра. Последовательно протаскивая заготовку через несколько отверстий с уменьшающимся диаметром, получали проволоку нужного размера.

На территории нашей Родины в XIII в. до н. э. были известны орудия и оружие из железа. Железо получали прямым восстановлением руд в сыродутных печах в форме губчатых криц, из которых ковали всевозможные изделия. Основное оборудование кузнеца Древней Руси составляли: кузнечный горн, меха, наковальня, а инструментом служили кувалды, зубила, клещи.

Металлографическое и рентгенографическое изучение железных изделий археологических памятников показало, что в X-XIII вв. н. э. техника обработки железа на Руси достигла большого совершенства. В то время широко применяли наряду со свободной ковкой кузнечную сварку, пайку медью, полировку, цементацию, термическую обработку (закалка, отпуск).

Примерно до XV века основной продукциейковки были косы, серпы, топоры, лемеха, предметы хозяйственного инвентаря, оружие, доспехи. Кузнечной сваркой получали многослойные мечи из полос железа и стали, наваривали стальные лезвия на железные топоры. Для изготовления кольчуг применяли волочение проволоки из мягкой стали. На одну кольчугу требовалось до 600 метров проволоки, из которой изготавливали примерно 20 тысяч колец. Каждое кольцо продевалось через соседнее и заваривалось с помощью кузнечной сварки. Значительное усовершенствование ручного волочения было достигнуто при изобретении волочильного производства с качающимся сиденьем.

Примерно до X века главными потребителями и изготовителями проволоки из меди, серебра, золота и их сплавов были мастера-ювелиры. Из проволоки делали золотошвейную пряжу и канитель – тонкие спирали, которые использовали для вышивания одежд, парчи. В XI-XIII веках волочение становится самостоятельной отраслью металлообработки. Создаются цеховые объединения волочильщиков проволоки. Их продукция предназначалась для изготовления иглол, булавок, гвоздей, щеток. Высокий уровень техники обработки железа в древней Руси и масштабы его производства позволили не только удовлетворить потребность страны, но и экспортировать железные изделия в западные страны.

Переход от сыродутного способа получения железа к доменному производству чугуна с последующим переделом его в железо в кричных горнах явился большим шагом вперед.

Создаются государственные металлургические заводы на Урале (1630 г.), начинается применение водяных двигателей для привода молотов и волочильных станов (1644 г.). Первый волочильный стан состоял из двух барабанов: рабочего и размоточного, между которыми размещалась волочильная доска. Рабочий барабан приводился в движение от энергии падающей воды.

К концу XVI века Новгород населяли около 5,5 тысячи людей разных профессий, 600 из них были связаны с обработкой металла: 112 кузнецов, 38 ножовщиков, 35 котельников, 21 гвоздочник, 18 оружейников, 17 замочников, 12 ведерников, по несколько человек лемешников, скобочников, игольников, булавоочников и так далее. По всей Руси жили десятки тысяч мастеров по обработке металлов давлением.

Развитие металлургии в России особенно ускоряется при Петре I. На Урале строятся казенные и частные заводы для выплавки меди и чугуна. К тридцатым годам XVIII в. Россия не только догнала западные страны по выплавке чугуна, но и опередила их и заняла первое место в мире.

Возникновение следующего по времени процесса обработки металлов давлением прокатки связывают с именем гениального художника и инженера Леонардо да Винчи, опубликовавшего в 1495 г. первые печатные материалы по прокатке. Со свойственными ему проницательностью и гениальностью он предложил прокатку стальных полос переменной толщины. Его предложение по прокатке конических орудийных стволов было осуществлено лишь в середине

50-х годов XX века. Однако до конца XVIII в. прокатку применяли для отделки предварительно откованных железных полос. Для уменьшения толщины кованных полос применяли прокатные станы "дуо" с цилиндрическими валками, называвшиеся тогда "плющильными машинами".

В конце XVIII века были сделаны крупные изобретения, способствовавшие значительному прогрессу в металлургии и, в частности, в обработке металлов давлением. Было изобретено пудлингование, позволившее получать железо в больших количествах, лучшего качества и более дешевое. Изобретение паровых машин для привода (Ползунов в 1760 г. и Уатт в 1784 г.) позволило создать мощные воздуходувки, обеспечивающие получение чугуна на коксе взамен древесного угля. Паровые машины для привода прокатных станов позволили обрабатывать железо из пудлинговых криц, минуя ковку. Началом применения прокатки для обработки железа считается 1784 г. (патент английского инженера Корта), хотя в 1782 г. на Черновском заводе был установлен стан для прокатки кровельных листов с приводом от водяного колеса. В 1839 г. был создан паровой молот (английский инженер Нейсмит). Указанные усовершенствования привели к значительному росту выплавки чугуна в начале XIX в. в западных странах, особенно в Англии, и к сокращению импорта железа из России.

Еще один способ обработки металлов давлением – прессование как технологический способ – стал возможным лишь в конце XVII в. Стимулом к воплощению идей, охватывающих процесс прессования, стала возрастающая в XVII-XVIII вв. потребность в трубах для подачи жидкостей.

Первый гидропресс для прессования запатентован в 1795-1797 гг. английским инженером Джозефом Брама, современником и конкурентом Д. Уатта. Пресс напоминал ручной насос и позволял прессовать свинцовые трубы. В 1820 г. англичанин Томас Барр сконструировал вертикальный гидропресс для прессования свинцовых труб. Пробразом современных горизонтальных гидропрессов для прессования стал пресс конструкции Г. Дика, созданный в Германии в 1894-1895 гг. Его появление положило начало промышленному применению прессования профилей и труб из меди, медных и алюминиевых сплавов. Этот процесс в известной степени стал вытеснять прокатку, обработку металлов резанием и литье.

Развитие железнодорожного транспорта в XIX в. потребовало большого количества стали для изготовления паровозов, вагонов, мостов, рельсов. Изобретение бессемеровского (1855 г.) и мартеновского (1865 г.) способов производства стали обеспечило ее получение в большом количестве в виде крупных слитков. Для их обработки потребовались мощные прокатные станы, молоты и прессы. Применение электродвигателей в конце XIX в. явилось дальнейшим шагом вперед в развитии металлургии, и особенно в обработке металлов давлением.

Несмотря на отставание в XIX в. металлургии России, во многих случаях русская техника опережала западную. Так, на русских военных заводах в 1800 г. применяли горячую объемную штамповку, а на западе этот процесс не был известен. Качество оружия, благодаря трудам Аносова и Обухова, было выше западно-европейского.

Для военных флотов сооружались первые броненосцы. Для этого нужны большие броневые плиты. Изготовление таких плит ковкой было процессом крайне трудоемким и дорогостоящим. В 1859 г. русский механик В.С. Пятов сконструировал первый в мире мощный прокатный стан для производства броневых листов. Этот стан стал предшественником современных обжимных станков – блюмингов и слябингов.

Начиная с середины XIX века чрезвычайно широкое распространение получает штамповка.

В XX веке строительство тракторных, автомобильных, авиационных и других заводов сопровождалось созданием на них современных цехов горячей объемной и холодной листовой штамповки. Получили большое развитие и процессы волочения, прокатки и прессования.

Сегодня в металлургии существуют пять основных способов обработки металлов давлением: ковка, штамповка, прокатка, волочение и прессование. Каждый из них имеет свою преимущественную область применения. Обычно при получении какой-либо детали на разных стадиях используют несколько видов обработки давлением. В результате все существующие способы дополняют друг друга, взаимно расширяют свои возможности.

Необычайно разнообразно оборудование для обработки металлов давлением: громадные обжимные прокатные станы и прессы, роботизированные ковочные комплексы, полностью автоматизированные штамповочные линии, деталепрокатные агрегаты, уникальные станы для получения тончайшей фольги и проволоки.

2. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ТЕРМИНЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

В последующих разделах приводятся основополагающие определения и термины, необходимые при изучении соответствующих курсов по материаловедению, металлургии, литейному производству и термической обработке. В основу определений и терминов положены стандартные материалы, а также сведения из источников [2-3]. Термины и определения приводятся по алфавиту.

2.1. Металлы и сплавы

Алюминиевые сплавы – сплавы на основе алюминия с добавками Cu, Mg, Zn, Si, Mn, Li, Cd, Zr, Cr и др. элементов.

Аморфный металл – металлический стеклопереохлажденный металл.

Армко-железо (АКМСО – сокращенное название фирмы «American Rolling Mull Corporation») – технически чистое железо, содержащее 99,8 % Fe.

Баббит (от имени американского изобретателя И. Баббита (I. Babbitt (1799-1862))) – общее название антифрикционных сплавов на основе Sn и Pb с добавками Sb, Cu и др. элементов.

Безоловянные бронзы – бронзы, не содержащие Sn и применяемые для литых полуфабрикатов и изделий.

Белый чугун (назван по виду излома, имеющего матово-белый цвет) – чугун, в котором весь углерод находится в форме цементита. Белый чугун при нормальной температуре состоит из цементита и перлита. Белый чугун обладает высокой твердостью и хрупкостью, практически не поддается обработке режущим инструментом; из него изготавливают детали, работающие в условиях сильного абразивного износа. Для увеличения износостойкости в состав белого чугуна вводят легирующие элементы, в основном Cr, V, Mn.

Бинарный сплав – сплав, состоящий из двух компонентов: двух металлов или металла и неметалла, в зависимости от состава и температуры бинарный сплав находится в различных агрегатном и фазовых состояниях.

Бронза (от итал. bronzo) – сплав на основе меди с различными химическими элементами, главным образом Sn, Al, Be, Pb, Cd, Cr и др. Соответственно бронзу называют оловянной бронзой, алюминиевой и т.п.

Губчатое железо, железная губка – пористый кусковой или пылевидный продукт, полученный из железной руды или ее концентратов восстановлением оксидов углеродом или CO.

Дуралюмин (от нем. Duren – город, где было начато промышленное производство сплава, и от алюминий), дюралюминий, дюраль – сплав Al с Si (2,2-5,2 %), Mg(0,2-2,7 %) и Mn(0,2-1,0 %).

Железоуглеродистые сплавы – сплавы Fe с C на основе Fe. Варьируя состав и структуру, получают железоуглеродистые сплавы с разнообразными свойствами. Различают чистые железоуглеродистые сплавы для исследовательских целей (со следами примесей) и технические железоуглеродистые стали – стали и чугуны. Технические железоуглеродистые стали содержат примеси, которые разделяют на обычные (P, S, Mn, Si, H, N, O), легирующие (Cr, Ni, Mo, W, V, Ti, Co, Cu и др.) и модифицирующие (Mg, Ca и др.).

Кипящая сталь – низкоуглеродистая сталь, выпускаемая из печи слабоокисленной. При ее застывании в изложницах продолжается окисление содержащегося в ней углерода кислородом, растворенным в стали, что внешне выражается выделением пузырьков газа (кипение).

Композиционные материалы (от лат. compositio – сочетание) – материалы, образованные объемными сочетаниями химически разнородных компонентов с четкой границей раздела между ними. Характеризуются свойствами, которыми не обладает ни один из компонентов, взятый в отдельности. Композиционные материалы обычно разделяют на три основные группы: волокнистые, состоящие из волокон одного компонента, распределенных в другом компоненте – матрице; дисперсные, состоящие из частиц одного или более компонентов, распределенных в матрице и образующих механическую смесь; слоистые, состоящие из двух или более слоев различных компонентов (биметаллические).

Латунь (от нем. latun) – сплав меди с цинком.

Лигатуры (от лат. ligo – связываю, соединяю) – элементы, вводимые в сплав для изменения строения сплавов, придания им определенных физических, химических или механических свойств.

Легкие сплавы – конструкционные сплавы, обладающие малой плотностью (сплавы на основе Al, Mg, Ti, Ba) и более высокой удельной прочностью (отношение показателя прочности к плотности материала), чем, например, конструкционные материалы на основе Fe, Ni или Co.

Легкоплавкие сплавы – двойные или многокомпонентные сплавы, температура плавления которых не превышает температуру плавления олова (232 °C). В состав легких сплавов входят Sn, Pb, Cd, Zn, Sb и др. элементы.

Металлические порошки – совокупность частиц металла, сплава и металлического соединения размерами до 1 мм, находящихся во взаимном контакте и не связанных между собой.

Металлический сплав – сложное вещество, в состав которого входят несколько элементов металлов. В широком толковании металлические сплавы могут быть названы металлами.

Модификатор (от лат. modifіco – имеющий форму) – вещество, малые дозы которого существенно изменяют структуру и свойства обработанного им металла или сплава. Эффект такой обработки называется модифицированием.

Пеноалюминий – алюминий или алюминиевый сплав, насыщенный водородом; плотность 230-750 % кг/м³. Используют пеноалюминий как конструкционный материал.

Передельный чугун – чушковый чугун, выплавляемый в доменных печах и предназначенный для дальнейшего передела в сталь или переплавки в чугунолитейных цехах при производстве отливок.

Серый чугун (название по виду излома, имеющего серый цвет) – чугун, в структуре которого имеются включения пластинчатого графита. По строению металлической основы серые чугуны делятся на перлитные, ферритно-перлитные, ферритные.

Силумин (от лат. silicium – кремний и aluminium – алюминий) – общее название группы литейных сплавов на основе Al, содержащих 10-13 % Si, а также некоторых примесей (Fe, Mn, Ca, Ti, Cu, Zn).

Спеченные сплавы – сплавы, полученные из металлических порошков методами порошковой металлургии. Известны спеченные сплавы на основе Fe, Ni, Al (САП – спеченная алюминиевая пудра, САС – спеченный алюминиевый сплав), Cu и других элементов, характеризующихся повышенной жаропрочностью и жаростойкостью.

Сплавы – материалы, образующиеся в результате затвердевания расплавов, состоящих из двух или нескольких компонентов.

Сталь (от нем. stahl) – деформируемый ковкий сплав железа с углеродом (до 2 %) и другими элементами. Сталь получают главным образом из чугуна, выплавляемого в доменных печах со стальным ломом.

Твердые сплавы – металлические материалы с высокими твердостью, режущей способностью и другими свойствами, сохраняющимися при нагревании до высоких температур. Применяют при изготовлении режущего и измерительного инструмента. Различают литые и металлокерамические твердые сплавы; последние получают методами порошковой металлургии из карбидов металлов, связанных пластичным металлом – связкой (например, сплавы ВК(WC + Co) и TiK(WC + TiC + Co)).

Ферросплавы – сплавы железа с другими элементами, применяемые для раскисления и легирования железоуглеродистых сплавов.

Чугун (тюрк.) – сплав железа с углеродом (C обычно более 2 % массовой доли), содержащий также постоянные примеси (Si, Mn и др.), а иногда и легирующие элементы. Чугун – важнейший первичный продукт черной металлургии, используемый для передела при производстве стали и как компонент шихты (чушковый чугун) при вторичной переплавке в чугунолитейном производстве.

2.2. Установки, печи, агрегаты

Вагранка (по В.И.Далю также вагранка; варганить – шуметь, работать, кипеть) – шахтная печь для плавки чугуна в литейных цехах.

Вакуумная плавка – плавка металлов и сплавов под пониженным остаточным давлением, чаще всего 100-0,1 МПа.

Ванная печь – 1) печь (электрическая или пламенная) для нагрева металлических изделий в жидкой среде (например в расплавленной соли); 2) плавильная печь (главным образом пламенная), рабочее пространство которой вытянуто в горизонтальном направлении и имеет вид ванны (например двухванная печь, мартеновская печь, отражательная печь).

Двухванная печь – сталеплавильный агрегат, в котором поочередно теплота отходящих газов, образующихся в одной из ванн при продувке расплавленного металла кислородом, используется для нагрева холодной шихты в другой ванне.

Доменная печь, домна – шахтная печь для выплавки чугуна из железной руды.

Дуговая печь – промышленная печь, в которой теплота электрической дуги используется для плавки металлов и сплавов.

Индукционная плавильная электропечь – печь, в которой металл находится в переменном электромагнитном поле, в результате чего в металле индуцируется нагревающий его электрический ток (рис. 1).

Канальная индукционная электропечь – индукционная плавильная электропечь, в которой плавка металла осуществляется в плавильном канале. Расплавленный металл в канале является вторичным витком трансформатора-индуктора (рис. 1).

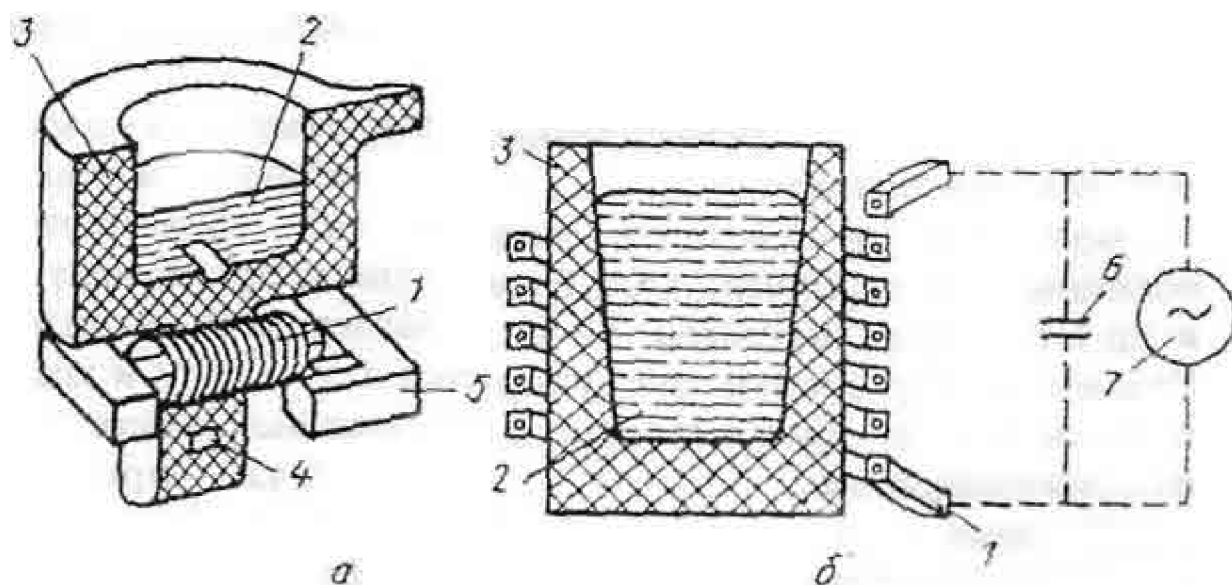


Рис. 1. Канальная (а) и тигельная (б) индукционные печи: 1 – индуктор; 2 – расплавленный металл; 3 – тигель; 4 – подовый камень с каналом; 5 – магнитный сердечник; 6 – конденсатор; 7 – генератор

Конвейерная печь – печь, снабженная внутренним конвейером (ленточным, люлечным, цепным и др.), перемещающим изделия в процессе их нагрева от загрузочного отверстия печи к разгрузочному.

Мартеновская печь (от имени французского металлурга П. Мартена (P.Marten; 1824-1915)) – пламенная регенеративная печь для производства стали из чугуна и стального лома.

Муфель (нем. muffel) – камера или колпак из огнеупорного материала или жаростойкой стали.

Отражательная печь – пламенная плавильная печь, в которой тепло передается нагреваемому материалу непосредственно от раскаленных продуктов сгорания топлива, а также излучением от нагретой огнеупорной кладки (например мартеновская печь).

Очаговая печь – металлургическая печь периодического действия для проведения плавки металлов и сплавов методом металлотермии.

Плавка – процесс переработки исходных шихтовых материалов (нагревание, проведение химических реакций, введение добавок и т.д.) в плавильных печах с получением конечного продукта в жидком виде.

Плазменно-дуговая печь – электрическая печь, в которой нагрев и плавление осуществляются с помощью плазменной дуги.

Пламенная печь – промышленная печь, в которой нагрев или плавление материала происходят при непосредственном сжигании топлива. Термопередача от газообразных продуктов сгорания осуществляется излучением и конвекцией, а также излучением от раскаленной внутренней поверхности огнеупорной кладки.

Раздаточная печь – промышленная печь для подогрева расплавленного металла (обычно цветного) и поддержания его температуры в требуемых пределах.

Тигельная печь – промышленная печь для плавления или нагрева материалов в тигелях.

Футеровка (от нем. futter – подкладка) – защитная внутренняя облицовка (из кирпичей, плит, блоков, а также набивная футеровка и др.) тепловых агрегатов, печей, топок, труб, емкостей и т.д. Различают футеровки огнеупорные (шамотные, диасовые, магнезитовые, доломитовые и др.), химически стойкие и теплоизоляционные.

Шахтная печь – печь с шахтой, в которую сверху загружают обрабатываемый продукт, выдается – снизу.

Электрическая печь – плавильная или нагревательная печь, в которой используется тепловой эффект электрических явлений. Электрические печи разделяются на дуговые печи, электрические печи сопротивления, электронно-лучевые печи, печи электрошлакового переплава и др.

Электрическая печь сопротивления – печь, в которой используется теплота, выделяющаяся при прохождении электрического тока через проводники с активным электрическим сопротивлением.

2.3. Способы получения металлов и сплавов

Алюминотермия (от алюминий и греч. therme – тепло, жар) – процессы, основанные на восстановлении порошкообразным алюминием кислородных соединений металлов.

Аффинаж (от франц. affiner – очищать) – металлургический процесс получения благородных металлов высокой чистоты путем отделения от них примесей.

Бессемеровский процесс (от имени англ. изобретателя Г. Бессемера (H. Bessemer)), бессемерование чугуна – сталеплавильный процесс, разновидность конвертерного процесса.

Восстановительный процесс – физико-химический процесс получения металлов из их оксидов отщеплением и связыванием кислорода восстановителем – веществом, способным соединяться с кислородом. Типичным восстановительным процессом является доменный процесс, в котором железо восстанавливается из руд главным образом углеродом или его оксидом.

Десульфурация (от де... и лат. sulphur – сера, обессеривание) – физико-химические процессы, способствующие удалению серы (S) из расплавленного металла (например чугуна, стали).

Дефосфорация (от де... и фосфор, обесфосфоривание) – физико-химические процессы, способствующие удалению фосфора из чугуна и стали по ходу плавки. Дефосфорация обычно достигается окислением P до P_2O_5 , который связывается в шлаки в тетракальциевый фосфат $4CaO \cdot P_2O_5$.

Кислородно-конвертерный процесс – конвертерный процесс, заключающийся в продувке жидкого чугуна технически чистым (более 95,5%) кислородом (рис. 2).

Конвертерный процесс – передел жидкого чугуна в сталь продувкой его в конвертере газами, содержащими кислород, либо технически чистым O_2 . В результате окисления примесей чугуна (C, Si, Mn, P) выделяется теплота в количестве, достаточном для поддержания металла в жидком состоянии в течение всего процесса без поступления теплоты из других источников. К конвертерному процессу относятся кислородно-конвертерный, бессемеровский и томасовский процессы.

Кристаллизация – образование кристаллов из паров, растворов, расплавов веществ, находящихся в твердом состоянии (аморфном или кристаллическом). Кристаллизация лежит в основе металлургических и литейных процессов.

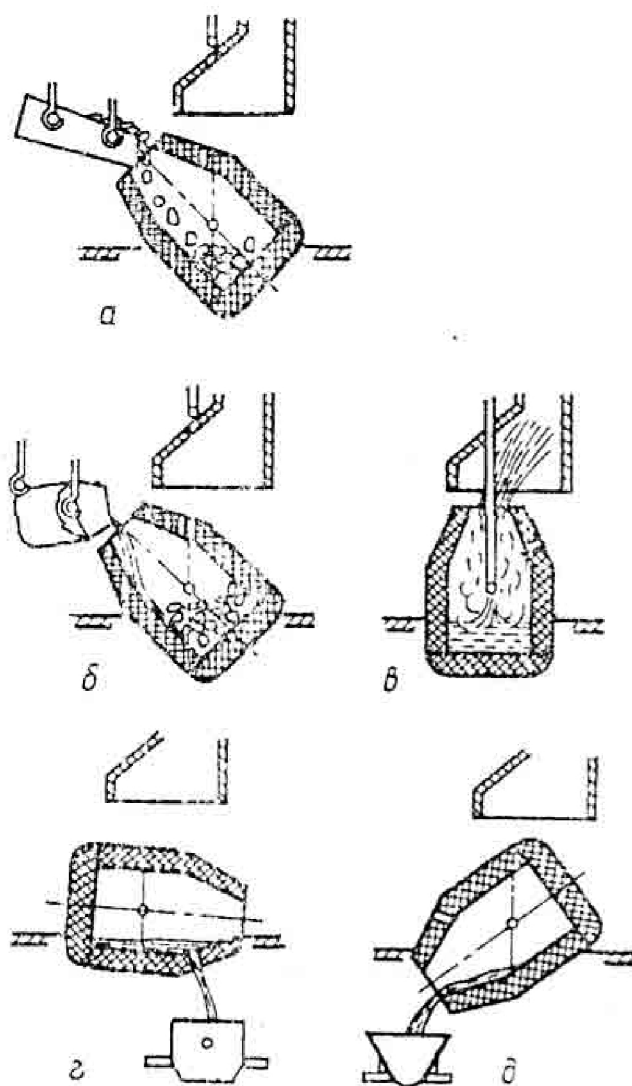


Рис 2. Схема кислородно-конвертерного процесса: а – загрузка металлолома; б – заливка чугуна; в – продувка чугуна; г – выпуск стали; д – слив шлака

Легирование – (от лат. ligo – связываю, соединяю) – введение в состав металлических сплавов т.н. легирующих элементов для изменения строения сплавов, придания им определенных физических, химических или механических свойств.

Металлизация – покрытие изделий из различных материалов тонким слоем металла, распылением его в расплавленном виде специальными аппаратами (с помощью сжатого воздуха). Проводят в декоративных целях для исправления пороков поверхности отливок, повышения их износостойкости или коррозионной стойкости.

Металлотермия (от металл и греч. therme – тепло, жар) – отрасль металлургии, использующая процессы восстановления металлов из оксидов и других соединений более активными металлами с выделением большого количества теплоты.

Металлургия (от греч. metallurgeo – обрабатываю металлы, добываю руду) – область науки и техники, а также отрасль промышленности, охватывающие процессы получения металлов из руд или других металлов, а также процессы, при которых металлическим сплавам путем изменения их химического состава и строения (структуры) сообщаются свойства, соответствующие назначению.

Монокристалл (от греч. monos – один кристалл) – единичный кристалл. Монокристалл выращивают искусственно из расплавов, растворов и парообразной фазы. Направленной кристаллизацией получают монокристаллические отливки, например лопатки турбин.

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) – разновидность самопроизвольного бескислородного горения подобранных компонентов смеси с образованием продуктов горения, содержащих, как правило, металлические фазы (твердые растворы элементов в металлах, карбиды, нитриды, бориды и др.)

Томасовский процесс (от имени англ. металлурга С. Дж. Томаса (S.G.Thomos; 1850-85)) – сталеплавильный процесс, разновидность конвертерного процесса. В отличие от бессемеровского процесса осуществляется путем донной продувки жидкого чугуна воздухом в конвертере с основной футеровкой (большей частью доломитовой), допускающей плавку под основными известковистыми шлаками.

Триплекс-процесс (от лат. triplex – тройной) – металлургический процесс расплавления и подготовки металла, проводимый последовательно в трех агрегатах, между которыми отдельные операции распределяются с учетом наиболее эффективного использования технико-экономических преимуществ каждого из этих агрегатов. Пример триплекс-процесса: "вагранка – дуговая печь – индукционная вакуумная печь".

Напыление – нанесение покрытий с особыми свойствами (декоративных, защитных, износостойких и др.) распылением жидкого или измельченного твердого вещества струей сжатого воздуха.

Плавка – процесс переработки исходных шихтовых материалов (нагрев до температуры плавления, проведение химических реакций, введение добавок и т.п.).

Пирометаллургия (от греч. pyr – огонь и металлургия) – совокупность процессов получения и очистки металлов и сплавов, протекающих при высокой температуре. Это основная область металлур-

гии. Примеры пирометаллургии: доменная, мартеновская, ваграночная плавки, плавка в конвертерах, дуговых и индукционных печах.

Порошковая металлургия – область науки и техники, охватывающая производство металлических порошков, а также изделий из них или их смесей с неметаллическими порошками.

Электролиз (от *электро...* и греч. *lysis* – разложение) – химические процессы, протекающие в электролите при прохождении через него постоянного электрического тока.

Электрометаллургия – область металлургической науки и техники, охватывающая такие процессы, как извлечение металлов из руд и концентратов, плавка и рафинирование металлов, а также их нагрев и придание им соответствующей структуры при помощи электрического тока.

2.4. Литейное производство

Изложница – 1) металлическая форма, заполняемая жидким металлом, в которой он затвердевает в слиток, для последующейковки или прокатки; 2) металлическая литейная форма (в центробежном литье), в которой залитый жидкий металл затвердевает в изделие под воздействием центробежных сил.

Кокиль (франц. *coquille*; букв. – раковина, скорлупа) – металлическая многократно используемая форма с естественным или принудительным охлаждением, заполняемая расплавленным металлом под действием гравитационных сил.

Литниковая система – система каналов и элементов литейной формы для подвода расплавленного металла в полость формы, обеспечения ее заполнения и питания отливки при затвердевании (рис. 3).

Литниковая чаша – элемент литниковой системы для приемки расплавленного металла и подачи его в форму.

Стояк – элемент литниковой системы в виде вертикального или наклонного канала для подачи расплавленного металла из литниковой чаши к другим элементам системы или непосредственно в рабочую полость формы.

Шлакоуловитель – элемент литниковой системы для задержания шлака и засора и подачи расплавленного металла из стояка к питателям.

Питатель – элемент литниковой системы для подвода расплавленного металла в полость литейной формы.

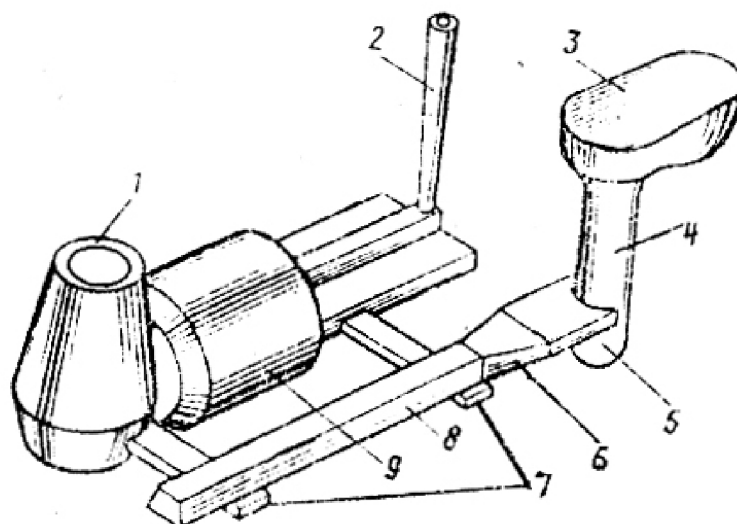


Рис. 3. Литниковая система: 1 – прибыль; 2 – выпор; 3 – литниковая чаша; 4 – стояк; 5 – зумпф; 6 – литниковый дроссель; 7 – питатели; 8 – шлакоуловитель; 9 – отливка

Выпор – элемент литниковой системы для вывода газов из формы, контроля заполнения формы расплавленным металлом и питания отливки при ее затвердевании.

Прибыль – элемент литниковой системы для питания отливок в период затвердевания с целью предупреждения образования усадочных раковин.

Горизонтальная литниковая система – литниковая система с питателями, расположенными в горизонтальной плоскости разъема формы.

Вертикальная литниковая система – обеспечивает подачу расплавленного металла в полость литейной формы сверху.

Дождевая литниковая система – вертикальная верхняя литниковая система, в которой подвод расплавленного металла осуществляется несколькими питателями.

Сифонная литниковая система – горизонтальная или вертикальная литниковая система, обеспечивающая подачу расплавленного металла в полость литейной формы снизу.

Литниковая система по разъему – литниковая система с подводом металла по плоскости разъема.

Ярусная литниковая система – вертикальная литниковая система, обеспечивающая подачу расплавленного металла в полость литейной формы на нескольких уровнях.

Литье – процесс получения изделий (отливок) из различных материалов (металлов, горных пород и др.).

Литье в песчаные формы – процесс получения отливок путем свободной заливки расплавленного металла в песчаные формы.

Литье в оболочковые формы – процесс получения отливок путем свободной заливки расплавленного металла в оболочковые формы из термореактивных смесей.

Литье по выплавленным моделям – процесс получения отливок путем свободной заливки расплавленного металла в формы, изготовленные по выплавленным моделям.

Литье в кокиль – процесс получения отливок путем свободной заливки расплавленного металла в металлические формы – кокили.

Литье под давлением – процесс получения отливок в металлических формах, при котором заливка в форму и формирование отливки осуществляются под давлением.

Центробежное литье – процесс получения отливок путем свободной заливки во вращающиеся формы, при котором формирование отливки осуществляется под действием центробежных сил.

Модельный комплект – комплект форм, приспособлений, необходимый для образования при формовке рабочей полости литейной формы; в комплекте содержатся: модель, стержневые ящики, модели литниковой системы, форм, контрольные и сборочные шаблоны для конкретной отливки.

Непрерывная разливка металла – разливка металла непосредственно из печи или ковша (через промежуточное устройство) в водоохлаждаемый кристаллизатор, из которого затвердевшая заготовка непрерывно вытягивается через отверстие в противоположном торце.

Оболочковая форма – разовая тонкостенная форма из химически твердеющих литейных смесей, которая перед заливкой может дополнительно упрочняться засыпчными материалами или другими способами.

Опока литейная – приспособление для удержания формовочной смеси при изготовлении литейной формы, транспортировании ее и при заливке жидким металлом.

Отливка – заготовка или деталь, получаемая заливкой расплавленного металла, минерала, шлака, стекла, пластмассы и т.д. в литейную форму.

Слиток – металл, затвердевший при остывании в изложнице; чаще всего имеет форму усеченной пирамиды, призмы (квадратной, прямоугольной или многогранной), цилиндра или конуса. Слиток – полуфабрикат для дальнейшей переработки.

Стержень литейный – элемент литейной формы для образования отверстия, полости или иного сложного контура в отливке.

Стержневой ящик – формообразующее изделие, имеющее рабочую полость для получения в ней стержня нужных размеров и очертаний из стержневой смеси.

Стояк – элемент литниковой системы в виде вертикального или наклонного канала для подачи расплавленного металла из литниковой чаши к другим элементам системы или непосредственно в рабочую полость формы.

Литейная форма – система элементов, образующих рабочую полость, при заливке которой расплавленным металлом формируется отливка.

Разовая форма – литейная форма, применяемая для заливки расплавленным металлом один раз и разрушаемая при извлечении отливки.

Многократная форма – литейная форма, применяемая для заливки расплавленным металлом более одного раза.

Сырая форма – разовая литейная форма, не подвергаемая перед сборкой и заливкой дополнительному упрочнению сушкой.

Сухая форма – разовая литейная форма, подвергаемая с целью дополнительного упрочнения сушке, при которой происходит удаление влаги.

Подсушенная форма – разовая литейная форма, рабочая поверхность которой дополнительно упрочняется на определенную глубину различными способами сушки.

Песчаная форма – разовая литейная форма, изготовленная из песчано-глинистой формовочной смеси с различными связующими добавками путем уплотнения.

Оболочковая форма из термореактивных смесей – оболочковая форма, изготовленная из специальной смеси с термореактивными связующими материалами формовкой по горячей модельной оснастке.

Форма по выплавленным моделям – оболочковая форма, изготавливаемая из специальной огнеупорной смеси по разовым моделям, которые после изготовления формы выплавляются, выжигаются или растворяются.

Керамическая форма – разовая химическая твердеющая литейная форма, изготовленная из специальной жидкоподвижной огнеупорной смеси способом наливки с последующим прокаливанием.

Формовка – процесс изготовления литейных форм и стержней из формовочной и стержневой смесей. Формовочные процессы классифицируют по способу изготовления – на формовку уплотнением смеси, формовку по СО₂-процессу, вакуумно-пленочную формовку; по используемой модельной оснастке – на формовку по модели, формовку по шаблону; по наличию опок – на опочную формовку, безопочную формовку, формовку в съемных опоках, формовку в почве, формовку в стержнях; по подготовке форм к заливке – на стопорную и этажную.

Формовка уплотнением смеси – формовка, при которой формовочная смесь уплотняется при приложении определенной работы.

Формовка по горячей модельной оснастке – формовка, при которой смесь наносится на горячую модельную оснастку и отверждается.

Формовка по выплавляемым моделям – формовка, при которой форма образуется многократным погружением разовой модели в огнеупорную смесь с последующей обсыпкой и отверждением.

Наливная формовка – формовка, при которой используются жидкоподвижные самотвердеющие формовочные и стержневые смеси.

Формовка по модели – формовка, при которой рабочая полость формы образуется по литейной модели.

Формовка по шаблону – формовка, при которой рабочая полость формы образуется снятием избыточной формовочной смеси по поверхности определенной рабочей частью шаблона.

Опочная формовка – формовка в двух и более опоках.

Формовка в съемных опоках – формовка в специальных съемных опоках, удаленных после изготовления формы.

Формовка в почве – формовка в формовочных ямах и в литейных кессонах.

Формовка в стержнях – формовка, при которой форма собирается целиком из стержней, образующих как внешние, так и внутренние очертания отливки.

Формовка по сырому – формовка, при которой сушке могут подвергаться только стержни.

Формовка по сухому – формовка, при которой все части формы или значительная часть их подвергается сушке.

Чушка – небольшой слиток металла (чугуна, цветных металлов, ферросплавов) в виде бруска, отливаемого в горизонтальном положении в открытую сверху форму (изложницы).

Электрошлаковое литье (ЭШЛ) – способ литья, при котором жидкий металл получают методом электрошлакового переплава, транспортируется (без доступа воздуха) в металлический кристаллизатор, являющийся литейной формой.

2.5. Металлография, термическая обработка

Азотирование, азотизация, нитрирование – диффузионное насыщение азотом поверхностного слоя стальных изделий (при 500-650°C на глубину 0,2-0,8 мм).

Алитирование (от нем. alitieren, от Al – алюминий) – диффузионное насыщение алюминием поверхности металлических изделий (из стали, чугуна и жаропрочных сплавов на Ni или Co основе).

Аллотропия (от греч. allos – другой и tropos – поворот, образ) – существование одного и того же химического элемента в виде двух или нескольких простых веществ, форм или модификаций.

Аустенит (от им. англ. металлурга У. Робертса-Остена (W. Roberts-Austen)) – фаза железоуглеродистых сплавов (тв. р-р углерода (до 2%) и легирующих элементов в γ -железе) (рис. 4).

Бемнит (от им. американского металлурга Э.Бейна, У.Байт) игольчатый троостит – структура железоуглеродистых сплавов, образующихся при термической обработке в результате промежуточного превращения аустенита (рис. 5).

Вторичный цементит – цементит, выделяющийся из аустенита при охлаждении заэвтектоидных сталей и доэвтектических чугунов (0,8-4,3 %C) ниже температур, соответствующих линии SEC диаграммы состояния "железо-углерод".

Гомогенизация – придание однородности растворам, эмульсиям, смесям. В металлургии Г. – создание однородной гомогенной структуры в сплавах путем термической обработки т.н. диффузионным или гомогенизирующим отжигом.

Графитизирующий отжиг, томление – одна из основных технологических операций процесса получения ковкого чугуна из белого специальной термической обработкой.

Дендрит (от греч. dendron – дерево) – кристалл древовидной, ветвистой формы, характерной для металлов и сплавов (рис. 6).

Диаграмма состояния, диаграмма равновесия, фазовая диаграмма – графическое изображение соотношений между параметрами состояния физико-химической системы (температурой, давлением и др.) и ее составом.

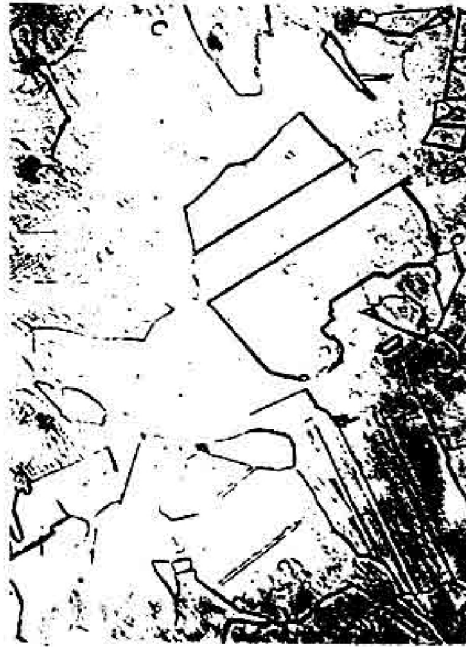


Рис 4. Аустенит, х 500 – тв. р-р углерода в γ -железе: кристаллическая решетка ГЦК; способен растворять до 2,14 % С, при 727 °С распадается на ферритоцементитную смесь

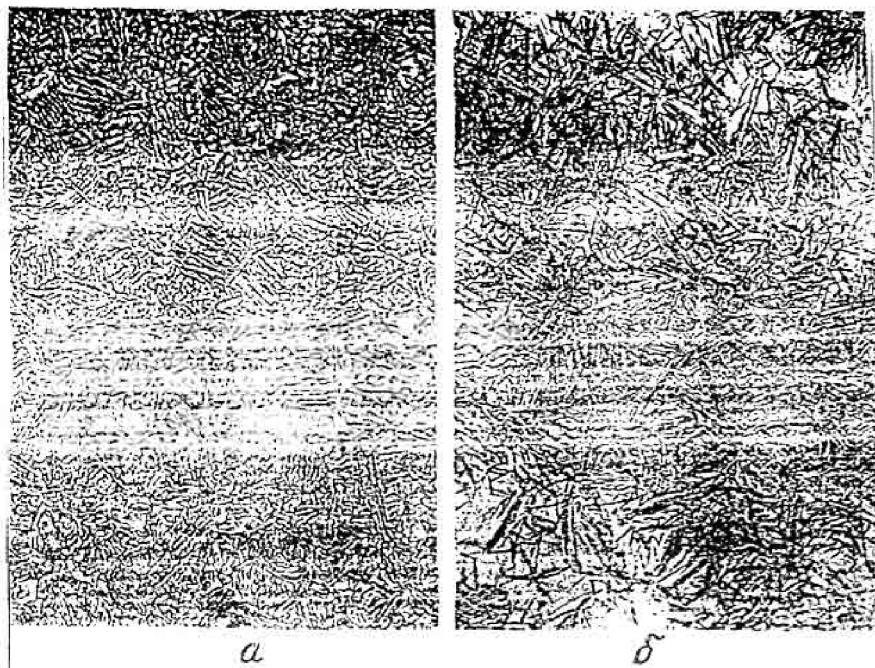


Рис. 5. Бейнит, х 1000: а – верхний (перистый): б – нижний (игольчатый)

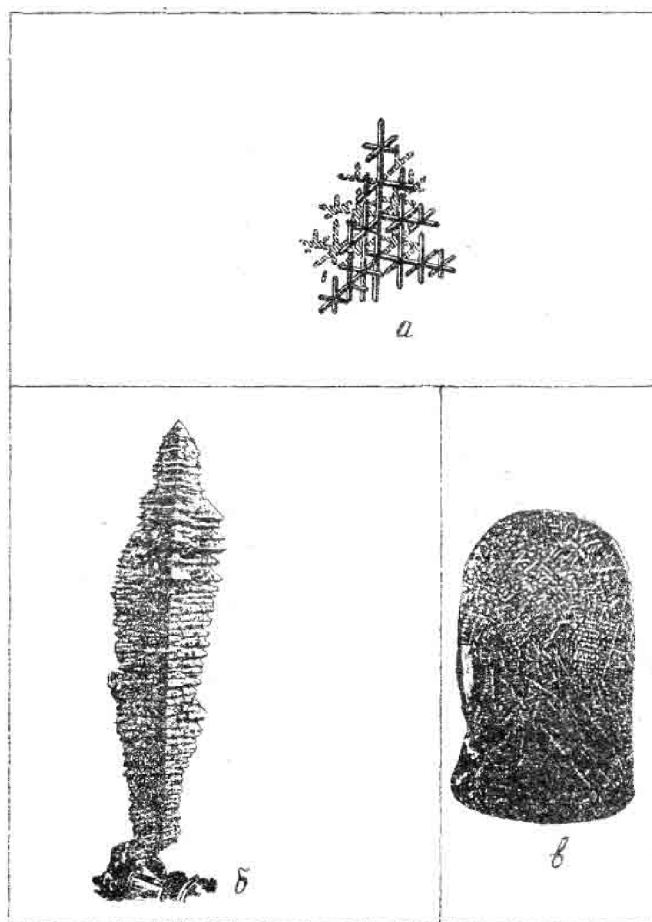


Рис. 6. Дендриты: а – схема роста по Д.К. Чернову; б – дендрит Д.К. Чернова; в – дендриты в стали

Дисперсионное твердение – процесс выделения упрочняющих фаз в дисперсионной форме из пересыщенного закаленного твердого раствора металла, происходящий при старении металлов.

Дозвтектические сплавы – сплавы, кристаллизация которых начинается с выделением кристаллов А, а затем эвтектики (А + В).

Закалка – вид термической обработки металлов (нагрев и быстрое охлаждение), после которой металл находится в т.н. неравновесном структурном состоянии.

Заэвтектические сплавы – сплавы, кристаллизация которых начинается с выделением кристаллов В, а затем эвтектики (А + В).

Зернистый перлит – эвтектоидная смесь феррита и цементита (в легированных сталях – карбидов), в которой цементит и карбиды имеют форму округлых зерен (или глобулей) и расположены на фоне зерен феррита.

Изотермический отжиг – вид отжига металлов (стали и чугуна), заключающийся в нагреве металла до аустенитного состояния (см. аустенит), выдержке при этой температуре, охлаждении при-

мерно до 600-700 °С, новой выдержке до окончания распада аустенита, а затем охлаждении до нормальной температуры.

Интерметаллид, интерметаллическое соединение – химическое соединение металла с металлом, например CuAl_2 , Al_2CuMg .

Карбиды – соединение углерода с металлом и некоторыми неметаллами.

Ковкий чугун (ковкий – назв., характеризующее большую пластичность ковкого чугуна по сравнению с серым чугуном) – чугун с хлопьевидным графитом, получившимся в результате специального графитизирующего или обезуглероживающего отжига.

Кристаллит – монокристалл неправильной формы, не имеющий характерной кристаллической огранки.

Кристаллическая решетка – присущее твердым кристаллическим телам расположение атомов, ионов, молекул, характеризующееся периодической повторяемостью в пространстве.

Кристаллы (от греч. *kristaltos*; букв. наз. – горный хрусталь) – твердые тела, имеющие упорядоченное взаимное расположение образующих их частиц, атомов, ионов, молекул, образующих т.н. кристаллическую решетку.

Критическая точка – точка на диаграмме состояния, соответствующая состоянию, в котором две сосуществующие фазы качественно подобны и находятся в равновесии.

Ледебурит (от им. нем. металлурга А.Ледебура (A. Ledebur, 1837-1906)) – одна из основных структурных составляющих железоуглеродистых сплавов, главным образом чугунов; представляет собой эвтектическую смесь аустенита и цементита, образующуюся при температуре ниже 1145 °С (для чистых сплавов Fe-C ниже 727 °С аустенит превращается в ферритоцементитную смесь) (рис. 7).

Ликвация (от лат. *liquaio* – разжижение, плавление), сегрегация (от лат. *segregatio* – отделение) – 1) неоднородность химического состава сплавов, возникающих при их кристаллизации. Л. обусловлена тем, что сплавы, в отличие от чистых металлов, кристаллизуются не при одной температуре, а в интервале температур. При этом состав кристаллов, образующихся в начале затвердения, может существенно отличаться от состава последних капель кристаллизующегося маточного раствора. Чем шире температурный интервал кристаллизации сплава, тем сильнее развивается Л., причем наибольшую склонность к ней проявляют те компоненты сплава, которые наиболее сильно влияют на ширину интервала кристаллизации (для стали

S, O₂, P, C). Различают дендритную Л., которая проявляется в микрообъемах сплава, близких к размеру зерен, и зональную Л. наблюдаемую во всем объеме отливки; 2) металлургический процесс разделения металлов основан на расслоении расплава вследствие разницы плотности его компонентов; 3) дефект в виде местных скоплений химических элементов или соединений в теле отливки, возникающих в результате избирательной кристаллизации при затвердевании.



Рис. 7. Ледебурит, х 500-эвтектическая смесь, состоящая из округлых темных включений перлита на светлой основе цементита; содержит 4,3 % С; образуется при 1147 °С из жидкости

Ликвидус (от лат. Liquidus – жидкий, расплавленный) – температура начала равновесной кристаллизации растворов или сплавов.

Мартенсит (от имени немецкого металловеда А. Мартенса (А. Martens, 1850-1914)) – микроструктура игольчатого вида, наблюдаемая в некоторых закаленных металлических сплавах и чистых металлах, которым свойственны полиморфные превращения (рис. 8).

Металлография (от металл, и греч-grapho – пишу) – раздел металлостроения, в котором изучают изменения структуры в связи с изменением химического состава и условий обработки металлов и сплавов.

Механическая смесь (в металлостроении) – строение сплавов из двух компонентов, которые не способны к взаимному растворению в

твердом состоянии и не вступают в химическую реакцию с образованием соединений (рис. 9, а).

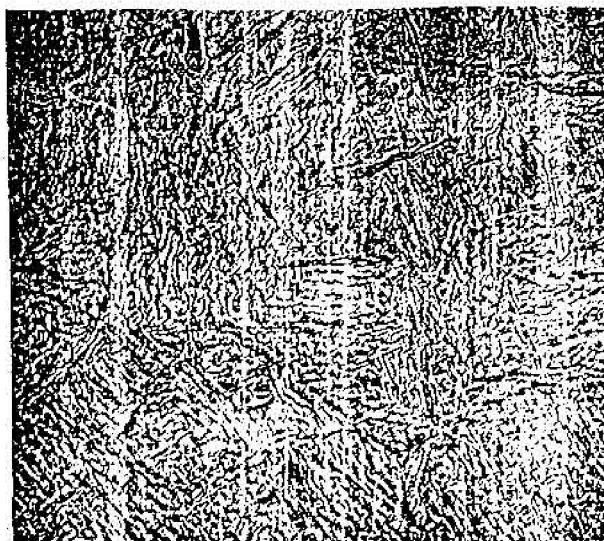


Рис. 8. Мартенсит, х 1000; светлая игольчатая структура

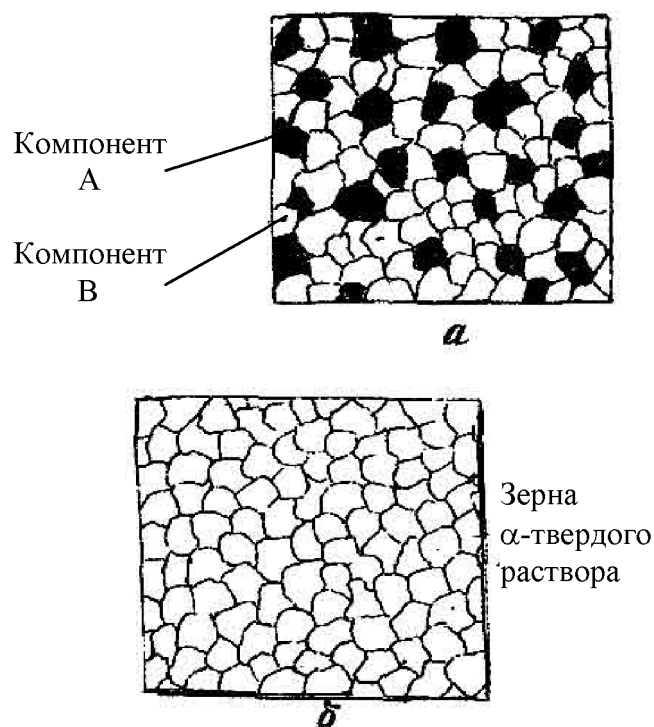


Рис. 9. Схемы микроструктуры сплавов типа механической смеси (а) и типа твердого (б)

Нитроцементация – химико-термическая обработка стали или чугуна, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхности металла азотом и углеродом из газовой среды при температуре 500-700°С (низкотемпературная Н.), 840-930 °С (высокотемператур-

ная Н.). Диффузионный слой (0,25-1,5 мм) сходен с цианированием стали.

Нормализация – термическая обработка стали, заключающаяся в ее нагреве (примерно до 750-950 °С), выдержке и последующем охлаждении на воздухе. Н. проводят для повышения механических свойств стали.

Обжиг – нагрев и выдержка при высокой температуре различных, главным образом неметаллических материалов с целью придания им необходимых свойств (например твердости или прочности), а также удаления примесей.

Отбел, отбеливание чугуна – образование структуры белого чугуна (цементита) в отливках из серого чугуна, обычно в их тонких сечениях или на поверхности отливки, соприкасающейся со стенкой формы.

Отжиг – вид термической обработки, заключается в нагреве металла или сплава, структура которого находится в неустойчивом состоянии в результате предшествующих обработок, выдержке при температуре нагрева и последующем медленном охлаждении для получения структур, близких к равновесному состоянию. Отжиг проводят для улучшения обрабатываемости, повышения пластичности, уменьшения остаточных напряжений.

Отпуск – термическая обработка сплавов, осуществляемая после закалки и представляющая собой нагрев до некоторой температуры с последующим охлаждением. Термин "О" применим главным образом к термообработке стали. Отпуск цветных сплавов называется *старением*.

Первичный цементит – цементит, выделяющийся из жидкого железоуглеродистого сплава (кристаллизация заэвтектических чугунов) при температурах, соответствующих линии CD диаграммы состояния "железо-углерод".

Пережог – неисправимый дефект металлических изделий, образующийся при высоком нагреве (близком к температуре плавления) в окислительной среде. Характеризуется появлением на границах зерен оксидных включений или оболочек, сильно снижающих прочность и пластичность металла.

Перлит (от франц. *perle* – жемчуг) – одна из структурных составляющих железоуглеродистых сплавов сталей и чугунов, представляет собой эвтектоидную смесь двух фаз – феррита и цементита (в легированных сталях – карбидов). Перлит – продукт эвтектоидно-

го распада аустенита при медленном охлаждении "Fe-C" – сплавов ниже 727°C , γ -железо переходит в α -железо, в котором около 0,02% C, избыточный C выделяется в форме цементита или карбидов. В зависимости от формы различают пластинчатый и зернистый перлит (рис. 10).



Рис. 10. Перлит, х 500 – эвтектоидная смесь, состоящая из пластинок феррита и цементита: содержит постоянное количество углерода 0,8 %; образуется из аустенита при 727°C

Пластинчатый графит – структурная составляющая серого чугуна, его отличительная особенность – пластинчатость.

Пластинчатый перлит – эвтектоидная смесь феррита и цементита (в легированных сталях – феррита и карбидов); обе фазы имеют форму пластинок.

Рекристаллизация металла (от ре... и кристаллизация) – образование и рост одних кристаллических зерен за счет соседних зерен той же фазы. Образование и рост зерен с более совершенной структурой за счет исходных деформированных зерен с менее совершенной структурой называется первичной рекристаллизацией металла, протекающей при отжиге после холодной деформации и прокатке, прессовании и т.д. при горячей деформации.

В результате рекристаллизации металла снижаются прочность и твердость металла и увеличивается его пластичность.

Сингулярная точка – точка, соответствующая на диаграмме состояния химическому соединению с максимальными или мини-

мальными значениями "концентрация – свойства" (в данном случае – перелом кривой).

С-кривая – краткое название диаграммы изотермического (проходящего во времени при постоянной температуре) фазового превращения, построенного в координатах температура – время.

Структура металла – собирательное название характеристик макроструктуры, микроструктуры, субструктуры и строение кристаллической решетки. Основные методы изучения структуры металлов – световая и электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, а также изучение изломов и макрошлифов невооруженным глазом и с помощью лупы.

Твердые растворы – однородные кристаллические вещества (фазы), состоящие из двух или большего числа компонентов и сохраняющие однородность при изменении соотношений между компонентами в определенном интервале концентраций. В твердых растворах замещения, образованных двумя металлами (например Cu и Ni), атомы одного металла (Ni) размещаются в узлах кристаллической решетки другого (Cu). В твердых растворах внедрения атомы неметалла (обычно) располагаются в промежутках между атомами металла. При образовании твердого раствора твердость и прочность металлов повышаются. Т.р. составляют основу всех важнейших технических сплавов – сталей, бронз, латуней, алюминиевых и магниевых сплавов (см. рис. 9, б).

Термическая обработка – процесс тепловой обработки сплавов с целью изменения структуры, а следовательно и свойств, заключающийся в нагреве до определенной температуры, выдержке и последующем охлаждении с заданной скоростью. Основные виды термической обработки: отжиг, нормализация, закалка, отпуск, старение, термомеханическая обработка, обработка стали холодом, электротермическая обработка, патентирование.

Троостит (по имени французского химика Л.-Ж. Труста, 1825-1911) – структурная составляющая железоуглеродистых сплавов, представляющая собой дисперсную смесь феррита и цементита; отличается от перлита и сорбита более тонким строением. Образуется при распаде аустенита в температурном интервале 400-500° С (троостит отпуска – зернистый цементит).

Улучшение (термообработка) – двойная термическая обработка железоуглеродистых сплавов, заключающаяся в закалке на мартенсит с последующим высоким отпуском (550-650°С).

Условное обозначение компонентов стали – в РФ установлены единые обозначения из букв и цифр марок стали. Первые две цифры в марке означают среднее содержание углерода (в сотых долях процента для конструкционных сталей и десятых – для инструмента и коррозионно-стойких сталей); буквами обозначают легирующие элементы: А – азот, Ю – алюминий, Р – бор, Ф – ванадий, В – вольфрам, К – кобальт, С – кремний, Г – марганец, Д – медь, М – молибден, Н – никель, В – ниобий, Т – титан, Х – хром, Ц – цирконий, У – углерод в углеродистой инструментальной стали. Цифры справа от буквы указывают среднее содержание элементов. Если за буквой не стоит цифры, это значит, что содержание элемента не превышает 1,5%. Буква А в конце обозначения марки указывает на сталь высокого качества, в начале – на повышенное содержание серы и фосфора.

Феррит (от лат. *ferrum* – железо) – фаза железоуглеродистых сплавов, твердый раствор углерода (до 0,02%) в α -железе. Феррит имеет кубическую объемно-центрированную решетку. В феррите могут быть растворены Si, Mn, Р и другие элементы. При 911-769°C феррит парамагнитен; от 769°C до абсолютного нуля – ферромагнитен. Феррит мягок и пластичен (рис.11).

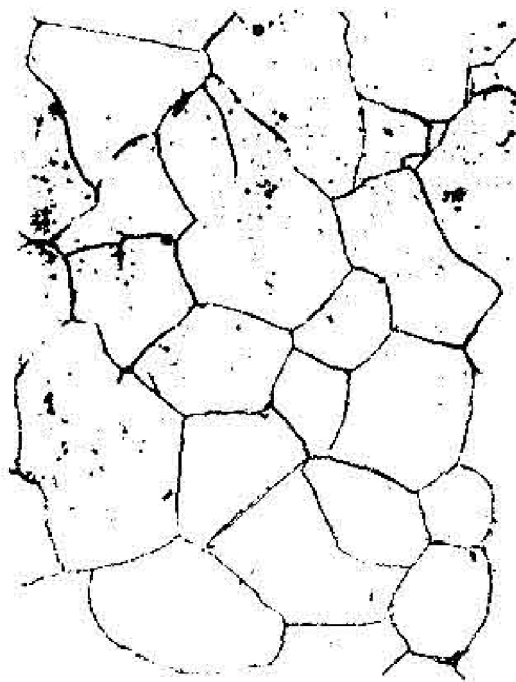


Рис. 11. Феррит, х 500 – тв.р-р углерода в α -железе; кристаллическая решетка ОЦК; способен растворять до 0,025% С; образуется из аустенита

Хладноломкость – склонность материалов к появлению или возрастанию хрупкости с понижением температуры.

Цвета каления – цвета свечения металла, зависящие от температуры нагрева (табл. 1).

Таблица 1

Цвета каления, характерные для стали

Температура, °С	Цвет каления
550	Тёмно-коричневый
630	Коричнево-красный
680	Темно-красный
740	Темно-вишневый
77G	Вишневый
800	Ярко- или светло-вишневый
850	Ярко- или светло-красный
900	Ярко-красный
950	Желто-красный

Цементация – химико-термическая обработка металлических изделий (преимущественно стальных) диффузионным насыщением поверхностных слоев углеродом при 900-950°С (науглероживание).

Цементит – карбид железа, Fe_3C – одна из структурных составляющих железоуглеродистых сплавов, содержащий 6,67 % С. Ц. хрупок, имеет высокую твердость; $t_{\text{пл}}=1250^\circ \text{C}$; относится к неустойчивым соединениям и при определенных условиях распадается с образованием свободного углерода в виде графита. Цементит способен образовывать твердые растворы замещения. Атомы С могут замещаться атомами неметаллов (N, O), атомы Fe – металлами (Mn, Cr, W и др.) Такой твердый раствор на базе решетки цементита называется легированным цементитом. Различают первичный, вторичный и третичный цементит (рис. 12).

Чернение – создание на поверхности металла черной оксидной пленки для повышения коррозионной стойкости или в декоративных целях. Чернение проводят погружением деталей в расплавленные соли или обработкой в водных растворах щелочей, кислот и солей. Чернение – разновидность воронения.

Эвтектика (от греч. eutektos – легко плавящийся) – тонкая смесь твердых веществ, одновременно начинающих кристаллизоваться из расплавов при температуре $t_{\text{пл}}$ отдельных компонентов или любых других их смесей. Примером эвтектики может служить, например, ледебурит.

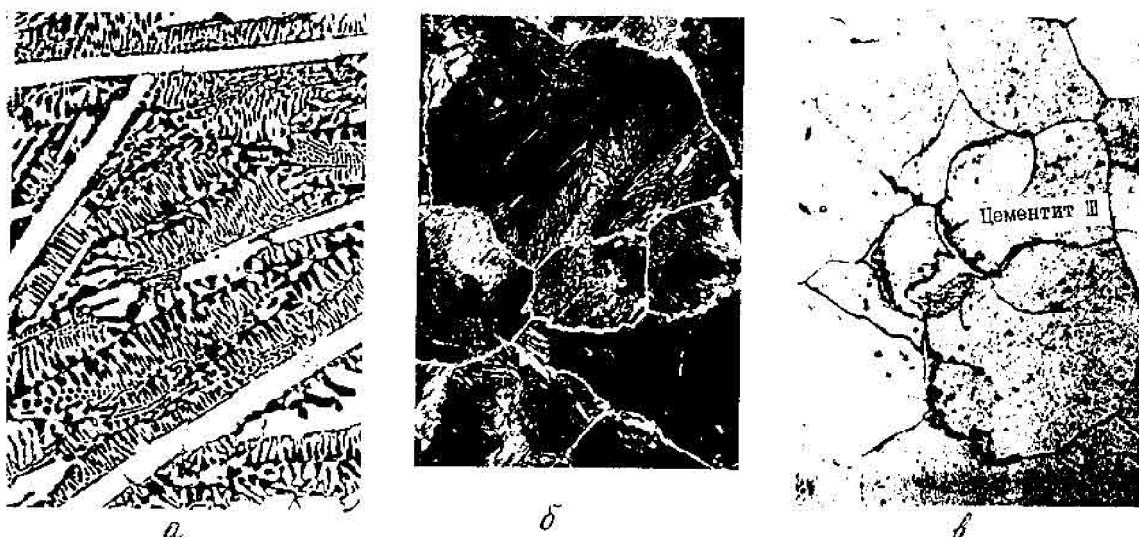


Рис. 12. Цементит, х 50: а – первичный: (Ц_I) – пластинчатые светлые кристаллы. Образуется при кристаллизации заэвтектических чугунов (4,3...7,0 % С, линия СД), х 500; б – вторичный: (Ц_{II}) – светлая сетка по границам зерен. Образуется у сплавов с содержанием 0,9...2,0 % С. Образуется при охлаждении аустенита в результате изменения растворимости углерода в аустените, линия ЕС, х 500; в – третичный; (Ц_{III}) – мелкие светлые включения на границе феррита. Образуется у сплавов с содержанием 0,01...0,025 % С, при охлаждении феррита в результате изменения растворимости углерода в феррите, линия PQ, х 500

Эвтектоид (от эвтектика и греч. eidos – вид) – аналогичная эвтектике структурная составляющая металлических сплавов, но в отличие от нее образующаяся не из жидкой, а из твердой фазы и поэтому имеющая более тонкое внутреннее строение из двух или более фаз. Пример эвтектоида – перлит.

Электротермическая обработка – метод термической обработки материалов, при котором нагрев осуществляется электрическим током.

3. ШИХТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Основными исходными материалами металлургического производства при выплавке металлов и сплавов являются следующие:

- 1) рудные материалы (руды металлов);
- 2) нерудные материалы (глинозем, кварцевый песок и др.);
- 3) отходы металлургического производства (собственные и привозные);
- 4) топливо;
- 5) огнеупоры;
- 6) флюсы (шлакообразующие, покровные, рафинирующие, модифицирующие, комбинированные).

Указанные материалы проходят предварительную подготовку для металлургического передела: дробление и измельчение, усреднение по химическому и гранулометрическому составам, обогащение и окускование.

Исходные материалы при выплавке сплавов называются шихтовыми (шихта). Для производства сплавов заданного химического состава применяют следующие составляющие шихты:

- 1) для чугунов – руда, агломерат, известняк, кокс;
- 2) сталей – перепельный чугун, отходы производства, добавки легирующие (технические металлы, ферросплавы), науглероживающие (кокс, чугун), окислители (руда, агломерат, технический кислород), шлакообразующие (кварцевый песок, шамотный бой, магнезит и др.), раскислители.

3) алюминиевых сплавов – отходы производства, первичные металлы и лигатуры. Ниже приведены марки первичных металлов и лигатур.

Первичные металлы:

Алюминий первичный в виде чушек следующих марок: А0, А5, А6, А7, А8, А85, А95, А99, А995.

Марганец в виде кусков марок МР1, МР2, МР3, МР4 (ГОСТ 6008-75).

Никель в виде катодных листов марок Н0, Н1, Н2, Н3 и гранул марок Н2, Н3, Н4 (ГОСТ 849-70).

Кремний – применяют марки Кр00, Кр0, Кр1 и Кр2 (ГОСТ 2169-69) и в виде силумина (с 10-13% Si) следующих марок: Сил00, Сил1, Сил2 (ГОСТ 1521-76).

Цинк в виде марок не ниже Ц1 (ГОСТ 3640-79).

Лигатуры (процент по массе легирующего элемента, остальное – алюминий):

Al-Cu – (40-50);

Al-Mn – (7-12);

Al-Ni – (15-20);

Al-Ti – (2-4);

Al-Fe – (5-10);

Al-Si – (15-20);

Al-Zr – (1-1,5).

Расчет шихты сводится к нахождению весовых соотношений исходных шихтовых материалов для приготовления сплава заданного химического состава. Расчет ведут на 100 кг сплава по среднему химическому составу с учетом угара компонентов сплава. Угар представляет собой безвозвратные потери металла на испарение, окисление (шлакообразование), взаимодействие с футеровкой печи.

Для расчета шихты необходимо знать:

- 1) средний химический состав выплавляемого сплава;
- 2) точный состав исходных шихтовых материалов;
- 3) угар компонентов сплава.

Химический состав определяется ГОСТом. Величина угара зависит от состава шихты, её компактности, типа печи, режимов плавки и т.д. Угар определяют по справочным или опытным данным. Расчет шихты ведется следующими методами.

1. Аналитический метод сводится к составлению и совместному решению ряда уравнений (число уравнений равно числу неизвестных). В целях упрощения расчет ведут только по основным элементам. Аналитический метод расчета применяют в том случае, когда в состав шихты входят отходы, возвраты и подготовительные сплавы. Применение же чистых металлов здесь исключается. Если же при решении системы уравнений получается отрицательный результат, это указывает на то, что из выбранных шихтовых материалов невозможно получить сплав заданного состава.

2. Арифметический метод. Этим методом пользуются тогда, когда количество отходов и подготовительных сплавов (лигатур) задано и требуется определить количество только чистых металлов для расшихтовки.

3. Метод подбора сводится к тому, что вначале шихта подбирается из исходных материалов на основании опыта. Затем определяется средний химический состав шихты. Если этот состав будет значительно отличаться от заданного, то работа повторяется заново до необходимого состава.

4. Графический метод. По известным графическим зависимостям определяется состав шихты для получения сплава заданного состава. Примеры расчета шихты арифметическим методом приведены в [4].

4. 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.

4.1. Алюминиевые сплавы

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; АК8МЗч(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. 2 приведен химический состав алюминиевых литейных сплавов, в табл. 3-7 механические, физические и технологические свойства, а также рекомендуемые режимы термической обработки и области применения сплавов. В скобках указаны обозначения марок сплавов по ГОСТ 2685-75.

Составы и свойства гранулированных сплавов приведены в табл. 8-11. Гранулируемый сплав 01419 относится к системе Al-Cr-Zr, химический состав в процентном отношении: Cr-1,3...1,8; Zr-1,3...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 температуре (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 САП1). Сплав удовлетворительно обрабатывается резанием. По жаропрочности при 350°C сплав 01419 не уступает САП1 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 $\text{Al}_3\text{Zr}(\text{Cr})$, Al_7Cr , X-фаза с решеткой $\text{Al}_6\text{Mп}$ (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 $\text{Al}_3\text{Fe}(\text{Al}_6\text{Fe})$. 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 10^6 °C/с. Коррозионная стойкость находится на уровне коррозионной стойкости сплавов системы Al-Mg-Si. Сплавы Al-Fe не подвержены коррозии под давлением.

Таблица 2

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

Группа сплавов	Марка сплава	Массовая доля, % основных компонентов							Сумма учиты- ваемых 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	-	-	-	-	Осталь- ное	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 (АЛ34)	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 (АЛ5)	0,35- 0,6	4,5-5,5	-	1,0-1,5	-	-	»	1,0	1,3	1,7
	AK8M (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
	AK8M3ч (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
	AK5M7 (АЛ10В)	0,2-0,5	4,5-6,5	-	6,0-8,0	-	-	»	2,7	2,7	3,0
	AK12MMгH (АЛ30)	0,8-1,3	11-13	-	0,8-1,5	-	0,8-1,3	»	-	1,1	-
	AK12M2MгH (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 (АЛ19)	-	-	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	AMг5K (АЛ 13)	4,5-5,5	0,8-1,3	0,1-0,4	-	-	-	»	0,6	0,6	1,8
	AMг5Mц (АЛ28)	4,8-6,3	—	0,4-0,1	-	-	-	»	0,5	0,6	0,7
	AMг6л (АЛ23)	6,0-7,0	Цирко- ний 0,05-0,20	Бериллий 0,02-0,10	-	0,05- 0,15	-	»	0,20	0,20	-
	AMг10 (АЛ27)	9,5- 10,5	Цирко- ний 0,05-0,20	Бериллий 0,05-0,15	-	0,05- 0,15	-	»	0,20	0,20	0,20
	AMг11 (АЛ22)	10,5- 13,0	0,8-1,2	-	-	0,05- 0,15	Бериллий 0,003- 0,007	»	0,5	1,0	1,2
	AMг6пч (АЛ23-1)	6,0-7,0	Цирко- ний 0,05-0,20	Бериллий 0,02-0,10	-	0,05- 0,15	-	»	0,05	0,05	-
	AMг10ч (АЛ27-1)	9,5- 10,5	-	-	-	0,05- 0,15	-	»	0,2	0,2	0,9
V Al- прочие компо- ненты	AK7Ц9 (АЛ11)	0,1-0,3	6,0-8,0	Цинк 7,0-12,0	-	-	-	»	1,7	1,9	2,5
	АЦ4Mг (АЛ24)	1,5-2,0	Хром 0,2-0,5	0,2-0,5	Цинк 3,5-4,5	0,1-0,2	-	»	0,90	-	-

Таблица 3

Механические свойства алюминиевых сплавов при комнатной температуре

Группа сплава	Марка сплава	Способ литья	Состояние, вид термо-обработки	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	НВ, кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	E, кгс/мм ²	G, кгс/мм ²	μ	КСУ, кгс/мм ²
				не менее							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I	AK12 (АЛ2)	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	-	-	-	-	-
	AK9ч (АЛ4)	З,О,В,К,Д	-	15	2	50	16	7000	2800	0,33	-
		К,Д	T1	20	1,5	60	-	-	-	-	-
		ЗМ,ОМ,ВМ	T6	23	3	70	20	7000	2700	0,33	0,4
		К,КМ	T6	27	3	70	-	-	-	-	-
	AK7ч (АЛ9)	З,О,В,К	-	16	2	50	-	-	-	-	-
		Д	-	17	1	50	-	-	-	-	-
		З,О,В,К,Д	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	-	-	-	-	-
	AK8Л (АЛ34)	З	T5	30	2	85	-	-	-	-	-
		З	T4	26	4	70	-	-	-	-	-
		К	T5	34	4	90	-	-	-	-	-
		К	T4	28	6	80	-	-	-	-	-
	AK5м	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	AK8М (АЛ32)	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	-	-	-	-	-
	AK5М7 (АЛ10В)	З	-	13	-	80	-	7000	-	-	0,2
		К	-	16	-	80	-	-	-	-	-
		К	T1	17	-	90	-	-	-	-	-
		З	T1	15	-	80	-	-	-	-	-
	AK12М2МгН (АЛ25)	К	T1	19	-	90	-	-	-	-	-
	AK12ММгН (АЛ30)	К	T1	20	0,5	90	-	-	-	-	-
	AK8МЗч	К	T4	35	5,0	90	-	-	-	-	-
		К	T5	40	4,0	110	-	-	-	-	-
В		T5	35	2,0	90	-	-	-	-	-	
Д		T5	35	2,0	90	-	-	-	-	-	

Окончание табл. 3

III	AM5 (АЛ19)	З,О,В,К З,О,В,К З	T4 T5 T7	30 34 32	8 4 2	70 90 80	16 22 -	7000 7000 -	- - -	- - -	0,8 - -
	AM4,5Kд	З,В	T4	30	10	70	-	-	-	-	-
		К	T4	32	12	80	-	-	-	-	-
		З,В	T5	40	7	90	-	-	-	-	-
		К	T5	44	8	100	-	-	-	-	-
IV	AMr5K (АЛ13)	З,О,В,К	-	15	1	55	10	6700	-	-	-
		Д	-	17	0,5	55	-	-	-	-	-
	AMr11 (АЛ22)	З,О,В,К	-	18	1	90	-	-	-	-	-
		З,О,В,К	T4	23	1,5	90	18	7000	-	-	-
		Д	-	20	1	90	-	7000	-	-	-
	AMr6л (АЛ23)	З,О	-	19	4	60	-	-	-	-	-
		К,Д	-	22	6	60	-	-	-	-	-
IV	AMr6Л4 (АЛ23-1)	З,О	-	20	5	60	-	-	-	-	-
		К,Д	-	24	10	60	-	-	-	-	-
		З,О,К	T4	25	10	60	-	-	-	-	-
	AMr10 (АЛ27)	З,О,К,Д	T4	32	12	75	-	-	-	-	-
	AMr10ч (АЛ27-1)	З,О,К,Д	T4	35	15	75	-	-	-	-	-
	AMr5Mц (АЛ28)	З,О,В	-	20	4	55	-	-	-	-	-
		К	-	21	5	55	-	-	-	-	-
V	AK7Ц9 (АЛ11)	Д	-	21	1	80	-	-	-	-	-
		З,О,В	-	18	1	80	-	-	-	-	-
		Д	-	18	1	80	-	-	-	-	-
	АЦМг (АЛ24)	З,О,В З,О,В	- T5	22 27	2 2	60 70	- -	- -	- -	- -	- -

Таблица 4

Физические свойства алюминиевых литейных сплавов

Группа сплава	Марка сплава	Плотность, кг/м ³	Коэффициент термического линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, 1/град при температурах, °C			Коэффициент теплопроводности λ , кДж/кг град при температурах, °C		Удельная теплоемкость С, кДж/кг град при температурах, °C		Удельное сопротивление $\rho \cdot 10^6$, Ом · см при 20°C
			20...100	20...200	20...300	15	300	20	100	
I	AK12 (АЛ2)	2650	21,1	21,1	23,3	176,4	-	-	-	-
	AK9ч (АЛ4)	2650	21,7	22,5	23,5	159,6	-	-	0,966	-
	AK7ч (АЛ9)	2660	23,0	24,0	24,5	151,2	-	-	0,966	-
II	AK5M (АЛ5)	2680	23,1	-	24,0	159,6	176,4	-	-	0,0462
	AK5M7 (АЛ10В)	2780	22,3	-	24,4	168,0	176,4	-	-	0,046
	AK12M2MгH (АЛ25)	2720	19,0	-	20,5	159,6	159,6	-	-	0,050
III	AM4,5Kд (АЛ19)	2780	19,5	-	25,6	105,6	142,8	-	-	-
IV	AMr5K (АЛ13)	2600	20,0	24,0	27,0	126,0	-	0,966	-	-
	AMr11 (АЛ22)	2500	25,6	24,5	27,3	84,0	-	0,924	-	-
V	AK7Ц9 (АЛ11)	2400	-	24,4	-	-	-	0,882	-	-

Таблица 5

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	АК12 (АЛ2)	577...577	420	820	3,0...3,5	0,9...1,0	>3,0	12,0:разрыв	<5
	АК9ч (АЛ4)	601...569	360	800	3,2...3,4	1,0...1,1	>3,0	20,0:разрыв	<5
	АК7ч (АЛ9)	620...577	350	770	3,7...3,9	1,0...1,2	>3,0	20,0:разрыв	<5
	АК8Л (АЛ34)	-	350	-	-	1,1	-	>30,0	<5
II	АК5М (АЛ5)	622...570	340	750	4,5...4,9	1,1...1,2	>3,0	16,0:разрыв	7,5
	АК8М (АЛ32)	-	380	-	-	0,95	-	-	30,0
	АК5М7 (АЛ10В)	-	-	-	-	0,95...1,1	-	-	17,5
III	АМ5 (АЛ19)	650-548	205	-	6,0	1,25	0,5:течь	3,5:течь	32,5
IV	АМг11 (АЛ22)	-	380	650	4,7	1,2...1,25	0,5:течь	0,5:течь	17,5
	АМг6л (АЛ23)	-	265	-	-	1,1	-	-	15,0
	АМг6лч (АЛ23-1)	-	265	-	-	1,1	-	-	15,0
	АМг10 (АЛ27)	-	270	-	-	1,1...1,2	-	-	16,5
	АМг10ч (АЛ27-1)	-	270	-	-	1,1...1,2	0,5:течь	3,0:течь	16,5
	АМ15Мц (АЛ28)	-	310	-	-	-	-	-	17,5
V	АЛ1	630...535	270	-	6,5	1,7	-	-	-
	АЛ11	-	400	-	4,0...4,5	1,2...1,4	>3,0	15,0:разрыв	<5,0
	АЛ21	-	360	-	-	1,2	-	-	22,5
	АЛ24	-	230	-	4,5...4,7	1,2	2,0:течь	18,0:течь	22,5
	АЛ25	-	425	-	-	1,15	-	-	5,0
	АЛ30	-	420	-	-	1,15	-	-	5,0

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 6

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...40мин	Вода до 50...100°C	175±5	8...10	»
II	АК7ч (АЛ9)	T6	-	535±5	То же	То же	195±5	30 мин	Вода до 50...10°C
		T2	-	-	-	-	370...380	2...4	Воздух
		T4	-	535+5	6...8	Вода	-	-	-
		T5	-	535±5	30...40мин	20...60°C	175±5	8	Воздух
		T6	-	535±5	2...6	То же	22±55	3...5	»
III	АК8л (АЛ34)	T2	-	535±5	10...16	Вода	175±5	-	-
		T4	-	535+5	10...16	20...100°C	-	6	Воздух
		T6	-	535±5	10...16	То же	175±5	6	Воздух
	АК5М (АЛ5)	T1	-	-	-	-	180±5	5...10	»
		T6	-	525±5	3...5	Вода	180±5	5...10	»
IV	АК12М2МгН (АЛ25)	T7	-	525±5	3...5	20...100°C	230±5	3...5	»
		T1	-	-	-	-	230±10	10...15	»
		T1	-	-	-	-	200±5	10...15	»
		T6	-	505±5	2...3	Вода	175±5	8	»
		T6	-	505±5	2...3	20...100°C	175±5	8	»
V	АК8М (АЛ32)	T1	-	-	-	-	180±5	3...5	»
		T1	-	-	-	-	180±5	3...5	»
		T1	-	-	-	-	180±5	3...5	»
		T1	-	-	-	-	180±5	3...5	»
		T1	-	-	-	-	180±5	3...5	»
VI	АМ5 (АЛ19)	T4	-	545+3	10...15	Вода	-	-	-
		T6	I	530+3	5...9	20...100°C	175±5	3...6	Воздух
		T6	II	545±3	5...9	Вода	175±5	3...6	»
		T7	-	545±3	10...13	80...100°C	250+10	3...10	»
		T7	-	545±3	10...13	80...100°C	250+10	3...10	»
VII	АМ6л (АЛ23)	T4	-	435±5	20	Вода	-	-	-
		T4	I	435+5	4	80...100°C	-	-	-
		T4	II	460+5	4	То же	-	-	-
		T4	-	435±5	20	Вода	-	-	-
		T4	-	435±5	20	90...100°C	-	-	-
VIII	АМ10 (АЛ27)	T4	-	435+5	20	Вода	-	-	-
		T4	-	435+5	20	90...100°C	-	-	-
		T4	-	435+5	20	Вода	-	-	-
		T4	-	435+5	20	90...100°C	-	-	-
		T4	-	435+5	20	90...100°C	-	-	-
IX	АМ10ч (АЛ27-1)	T4	I	435±5	4	Вода	-	-	-
		T4	II	460±5	4	90...100°C	-	-	-
		T4	-	435±5	4	Вода	-	-	-
		T4	-	435±5	4	90...100°C	-	-	-
		T4	-	435±5	4	90...100°C	-	-	-
X	АЦ4Мг (АЛ24)	T1	-	-	-	Вода	220+5	8...10	Воздух
		T5	-	580+5	4...6	100°C	120±5	8...10	»
		T5	-	580+5	4...6	или воздух	120±5	8...10	»
		T5	-	580+5	4...6	или воздух	120±5	8...10	»
		T5	-	580+5	4...6	или воздух	120±5	8...10	»

Таблица 7

Технологические свойства и области применения алюминиевых литейных сплавов

Группа сплава	Марка сплава	Температура литья, °C	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°C
	AK5M7 (AL10B)	700	»	Повышенная	»	Пониженная	Поршни для автофакторных двигателей, работающих до 250°C
III	AM5 (AL19)	750	Хорошая	Хорошая	Пониженная	»	Высоконагруженные детали, работающие до 20°C, и другие детали, работающие до 300°C
IV	AMr5K (AL13)	-	Удовлетворительная	Повышенная	-	Повышенная	Детали средней нагруженности
	AMr11 (AL22)	-	»	Хорошая	-	»	Детали, работающие в морской воде
V	AK7LC9 (AL11)	-	Хорошая	»	Средняя	-	Детали, требующие специальных мер защиты от коррозии, сложной конфигурации, средней нагруженности

Таблица 8

Механические свойства прессованных прутков из сплава 01419 при различных температурах

T _{исп} , °C	Механические свойства прессованных прутков при растяжении				σ_{100} , кгс / мм ²	КСУ, кгс / мм ²
	σ_B , кгс / мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс / мм ²	δ , %	ψ , %		
-196	63,7	51,0	16,0	30,5	-	4,8
20	34 Л	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	16,4	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 10^7 циклов при комнатной температуре составляет 110 МПа, а сопротивление повторно-статической нагрузки при $\sigma_{\max} = 0,7\sigma_B$ равно 10^5 .

Таблица 9

Механические свойства листов из сплава 01419 при различных температурах

$T_{исп}, ^\circ C$	$\sigma_B, \text{кгс/мм}^2$	$\sigma_{0,2}, \text{кгс/мм}^2$	$\sigma, \%$
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

Примечание. 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 13x150 мм.

5. Горячая прокатка полос на листы толщиной 2 мм.

6. Холодная прокатка листов до толщины 0,9 мм.

$$\sigma_{100} = 3,5 \text{ кгс/мм}^2.$$

Таблица 10

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

$\Sigma \text{ПМ}, \%$	$T_{исп}, ^\circ C$	$\sigma_B, \text{кгс/мм}^2$	$\sigma_{0,2}, \text{кгс/мм}^2$	$\delta, \%$	$\sigma_{100}, \text{кгс/мм}^2$
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 11

Механические свойства прессованных из мелких гранул прутков сплавов Al-Fe

Сплав	$\sigma_B, \text{кгс/мм}^2$	$\sigma_{0,2}, \text{кгс/мм}^2$	$\delta, \%$	$\psi, \%$
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 6x50мм (вытяжка соответственно 31 и 24).

4.2. Магниевого сплавы

Магниевого 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(МЛ2).

II. Сплавы на основе системы Mg-Al-Zn (МЛ4, МЛ4п.ч., МЛ5, МЛ5п.ч., 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 (МЛ4п.ч., МЛ5п.ч., 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, МЛ4п.ч., МЛ5, МЛ3п.ч., 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).

Магниевого сплавы разделяют также на следующие группы:

- сплавы средней прочности (МЛ7-1);

- сплавы высокой прочности (МЛ4, МЛ4п.ч., МЛ5, МЛ5п.ч., 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. 12-17)

Упрочняющими фазами этой системы являются соединения Mg₁₇Al₁₂ и Mg₃Al₂Zn₃.

Сплавы, легированные редкоземельными металлами – цирконием (табл. 18-23)

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. 24,25. 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°С.

Таблица 12

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	Основа	-	0,25	0,1	0,06	0,01	0,002	0,002	0,5
МЛ4п.ч.	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
МЛ5п.ч.	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 13

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

Марка сплава	Вид полуфаб-риката	Спо-соб-лителья	Состояние	E	G	μ	σ _{пц}	σ _{0,2}	σ _в	ψ	δ	τ _{0,2}	KCU	σ ₋₁ , кгс/мм ²	
				кгс / мм ²			кгс / мм ²			%		кгс/мм ²		Образцы	
														глад-кий	надре-зан
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
МЛ4	Отдельно отлитые образцы (Ø12 мм)	3	Без термообра-ботки	-	1600	0,33	-	9,5	18,0	5,0	6,0	13,0	0,2	4,5	-
			Закаленные (Т4)	4200	1600	0,33	1,8	8,5	25,0	9,0	13,0	13,5	0,4	-	-
			Закаленные 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
МЛ5	Отдельно отлитые образцы (Ø12 мм)	3	Без термообра-ботки	4200	1600	0,34	-	9,5	16,0	3,0	4,0	-	-	4,5	-
			Отожженные(Т2)	4200	1600	0,34	-	8,0	16,0	5,0	6,0	12,0	0,2	-	-
			Закаленные (Т4)	4200	1600	0,34	3,0	9,0	25,0	9,0	15,0	13,5	0,5	8,5	7,0
	Образцы, вырезан-ные из отливок (Ø 6 мм)	3,К	Закаленные 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
			Закаленные (Т4)	-	-	-	-	9,0	22,5	6,0	-	-	-	-	-
МЛ6	Отдельно отлитые образцы (Ø12 мм)	3	Без термообра-ботки	4200	-	0,33	-	11,0	16,0	1,5	2,5	-	-	6,0	4,5
			Закаленные (Т4)	4200	-	0,33	-	10,0	25,0	5,0	12,0	-	-	9,5	7,5
			Закаленные 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 термообра-ботки и после термообработки по режиму Т2	4200	1550	0,35	-	7,0	18,0	6,0	7,0	-	-	-	-

Таблица 14

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, °C							Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м · град при температурах, °C				Удельная теплоемкость, С кДж/кг · град
		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 15

Технология литья магниевых литейных сплавов системы Mg-Al-Zn

Марка сплава	Способ литья	Температурный интервал кристаллизации, °C	Температура литья, °C	Линейная усадка, %	Жидкотекучесть (по длине прутка), мм	Горячеломкость (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	-	-	-	»
	З,О	600...430	720...760	-	-	-	»
МЛ6	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 в МЛ4 в кокиль не рекомендуется. 2. Сплав МЛ5 имеет малую прочность к образованию горячих трещин. 3. Сплав МЛ6 обладает хорошими линейными свойствами. 4. Сплав МЛ7-1 имеет удовлетворительные линейные свойства.

Таблица 16

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

Марка сплава	Вид термообработки	Температура нагрева, °C	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	» » »
	Закалка в воде и старение (Т61)	Зак. 360±5+ 410±5 Ст. 190±5	3 21...29 4...8	Вода 90°C Воздух
МЛ7-1	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 17

**Некоторые технологические и физические характеристики
магниевого литейного сплава системы Mg-Al-Zn и их применение**

Марка сплава	Свариваемость		Обрабатываемость резанием	Коррозионная стойкость	Примечание
	Метод сварки	Температура предварительного подогрева, °C			
1	2	3	4	5	6
МЛ4	Аргонно-дуговая и газовая	350... 380	Отличная	МЛ4 - удовл. МЛ4п.ч.-повышенная	Корпусные детали и детали управления летательных аппаратов, корпуса приборов и инструментов
МЛ7	Аргонно-дуговая и газовая	350... 380	Отличная	Удовлетворительная	Детали двигателя, нагревающиеся при эксплуатации до 200°C

Таблица 18

**Химический состав магниевого сплава, легированного цинком,
РЗМ и цирконием, % по массе**

Марка сплава	Zn	Zr	Cd	Mg	La	Nd	Ag	Jn	Al	Si	Fe	Ni	Cu	Be	Zn	Проч. при- мес.	Сумма при- мес.
									Не более								
МЛ8	5,5... 6,6	0,7... 1,1	0,2... 0,8	Ос- нова	-	-	-	-	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... 1Д	0,2... 1,2	»	-	0,03... 0,3	-	-	0,03	0,03	0,01	0,01	0,03	-	-	-	0,20,25
ВМЛ6	7,0... 8,0	0,7... 1,1	0,4... 1,0	»	-	-	1,0... 1,6	-	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 19

**Механические свойства при комнатной температуре
магниевого литейного сплава, легированного цинком, РЗМ и цирконием**

Марка сплава	Вид полуфабриката	Спо- соб литья	Состояние	E	G	μ	σ _{пц}	σ _{0,2}	σ _в	τ _{ср}	δ ₁₀	ψ	KCU, кгс / мм ²	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 от- литые образцы (Ø 12 мм)	3	Закаленные и со- старенные(Т6)	4200	1600	0,33	10	19	29	-	6	13	0,3	7,5
			Закаленные и со- старенные(Т61)	4200	1600	0,33	12	20	30	-	7	8	0,3	7,5
	Образцы, вы- резанные из отливок (Ø 6 мм)	3	Закаленные и со- старенные(Т6)	-	-	0,33	-	19	27	-	5	-	-	-
			Закаленные и со- старенные(Т61)	-	-	-	-	20	28	-	6	-	-	-
МЛ12	Отдельно от- литые образцы (Ø 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, вы- резанные из отливок (Ø 6 мм)	3,К	То же	-	-	-	-	15	24	-	6	-	-	-
МЛ15	Отдельно от- литые образцы (Ø 12 мм)	3	Состаренные (Т1)	4300	1600	0,34	8	15	22	15	4	5	0,2	-
ВМЛ5	То же	3	Закаленные и со- старенные (Т61)	4200	1550	0,35	14	21	31	15	5	8	0,3	-
ВМЛ6	Отдельно от- литые образцы (Ø 12 мм)	3	Закаленные и со- старенные (Т6)	4300	1600	0,34	17	25	34	-	7	12	0,28	9,0
	Образцы, вы- резанные из отливок (Ø 6 мм)	3,К	То же	-	-	-	-	24	33	-	7	-	-	-
		3,К	»	-	-	-	-	25	34	-	8	-	-	-
МЛ9	Отдельно от- литые образцы (Ø 12 мм)	3	»	4300	1600	0,34	6	12	25	17	6	8	0,65	6
МЛ15	Отдельно от- литые образцы (Ø 12 мм)	3	Состаренные (Т1)	4300	1600	0,34	8	15	22	15	4	5	0,2	-
МЛ10	То же	3	Т6	4200	1650	0,33	10	15	25	18	5	7	0,5	-
	Образцы, вы- резанные из отливок (Ø 6 мм)	3	Т61	4200	1650	0,33	10	17	27	18	5	7	0,5	-
		3,О	Т6	-	-	-	-	-	14	23	-	7	-	-
		3,О	Т61	-	-	-	-	-	15,5	24	-	-	-	-
		К	Т6	-	-	-	-	-	15	25	-	-	-	-
		К	Т61	-	-	-	-	-	16	26	-	-	-	-

Окончание табл. 19

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
МЛ11	Отдельно отлитые образцы (Ø 12 мм)	3 3 3	Отожженные (Т2) Закаленные (Т4) (Т6)	4200 4200 4200	1600 1600 1600	- - -	4 4 4,5	10,0 9 10,5	13 15 16	- 12 12	3 5 3	3,5 7 5	- - -	- 7 -
МЛ17	Отдельно отлитые образцы	3,О К,В,Г	Т61	- -	- -	- -	- -	13 19	19,5 27	- -	2 2	- -	- -	- -
МЛ18	То же	То же	Т6 Т61	- -	- -	- -	- -	24 25	29 30	- -	3 3,5	- -	- -	- -
МЛ19	»	»	Т6	-	-	-	-	12	18	-	2,5	-	-	-

Таблица 20

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 С, кДж/кг·град при температурах, °С				Удельное сопротивление $\rho \cdot 10^6$, Ом·см при 20°С
		20...100	20...200	20...300	100...200	200...300	25	100	200	300	100	200	300	400	
МЛ8	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	8,44
МЛ11	1800	21,9	22,7	24,8	23,5	25,0	105	109	113	117	-	-	-	-	-

Таблица 21

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	3,К,О	635... 525	720... 800	1,3...1,4	290	30... 32,5	Повышенная по сравнению с МЛ5
МЛ12	3 К О В,Г	644... 550	740... 800 720... 800	1,3...1,4	290	30... 32,5	Повышенная
МЛ15	3	630... 539	720... 790	1,2...1,5	320	27,5... 30	>300 атм при гидроиспытании
ВМЛ5	3	625... 460	720... 800	1,2...1,4	300... 330	27,5... 30	Повышенная по сравнению с МЛ5
ВМЛ6	3,К,О	620... 415	720... 800	1,2...1,4	315	17, 5... 30	Повышенная
МЛ9	3 К	650... 558	720... 800 720... 800	1,2...1,4 1,2...1,4	250 -	25 -	»
МЛ10	3 К	640... 550	720... 800 680... 780	1,2...1,5 1,2...1,5	250 -	15... 20 -	»
МЛ11	3 К	645... 590	720... 800 680... 780	1,2...1,5 1,2...1,5	290 -	20 -	Повышенная по сравнению с МЛ5

Таблица 22

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

Марка сплава	Вид термообработки и маркировка	Температура нагрева, °C	Выдержка, ч	Охлаждающая среда
1	2	3	4	5
МЛ8	Закалка и старение (Т6)	Закалка с 490 ±5	5	Сжатый воздух
	Закалка и старение (Т6)	Старение при 165±5 или 130±5 То же	24(28) 5 24(28)	Воздух Горячая вода (90°±10°) Воздух
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.) Старение при 150+10	4...8 ч+10...30 мин 24...50	Вода 80...90°C или масло 20...30°C Воздух
ВМЛ5	Закалка и старение (Т6)	Закалка с 440-10 Старение при 150+10	4...8 24...50	Обдув сжатым воздухом Воздух
ВМЛ6	Закалка и старение (Т61)	Закалка с 430±5	8	Сжатый воздух
		Старение при 130+5	48	Воздух
		Закалка с 430+5	8	Вода (90°+ 10°)
		Старение при 130±5	48	Воздух
МЛ9	Закалка и старение (Т6)	Закалка с 540±5 Старение при 200±5	8...12 6...12	Сжатый воздух Воздух
МЛ10	То же		8...12	Сжатый воздух
	Закалка и старение (Т61)	Закалка с 540±5 Старение при 205+5	12...18	Воздух
			4...8 8...12	Вода > 80° Воздух
МЛ11	Отжиг (Т2)	325+5	3...5	Воздух
	Закалка (Т4)	570+5	4...6	Сжатый воздух
	Закалка и старение (Т6)	Старение при 200±5	12...16	Воздух

Таблица 23

**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, °C			
1	2	3	4	5	6
МЛ8	Аргонно - дуговая	400... 440	Отличная	Удовлетворительная	Высоконагруженные детали(кронштейны, фермы, детали управления, барабаны)
МЛ12	»	400... 440	»	»	Нагруженные детали, длительно работающие до 200°C и кратковременно до 250°C
МЛ15	»	до 440	»	»	Нагруженные детали, длительно работающие до 200°C, кратковременно до 350°C, детали высокой герметичности
ВМЛ5	»	400... 440	»	»	Нагруженные детали, длительно работающие до 150°C и кратковременно до 200°C

1	2	3	4	5	6
ВМЛ6	»	400...420	»	Пониженная	Высоконагруженные детали, длительно работающие до 150°C и кратковременно до 200°C
МЛ9	»	400...440	»	Удовлетворительная	Детали, длительно работающие до 250...300°C, кратковременно до 350...400°C
МЛ10	»	400...440	»	»	Нагруженные детали, длительно работающие до 250°C, кратковременно до 350°C, детали высокой герметичности; детали с высокой стабильностью размеров
МЛ11	»	400...440	»	»	Детали двигателя, нагревающиеся при работе до 250...300°C, а также детали повышенной герметичности

Таблица 24

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 25

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

4.3. 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 (BT1-0, 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. 26-32 приведены сплавы, свойства, режимы термической обработки и другие данные титановых сплавов.

Таблица 26

Химический состав и стандартные свойства некоторых деформируемых титановых сплавов

Марка сплава	Состав, % по массе							Вид полуфабриката	Состояние	E, МПа	σ_b , МПа	δ , %
	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.	»	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	5,3-6,8	-	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	»	11500	930-1100	10
BT9	5,8-7,0	0,8-2,5	-	2,8-3,8	-	0,2-0,35	-	»	»	11500	1100-1300	8-14
BT22	4,5-5,9	-	4,0-5,5	4,0-5,5	0,5-2,0	-	0,5-1,5Fe	Прутки	»	11500	1100-1250	8

Окончание табл. 26

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Псевдо - β-сплавы												
BT15	2,5-3,5	-	-	6,5-7,5	6,5-11,5	-	-	Листы	Закладка	85000	880-1020	12-25
ТС6	3	-	6	5	11	-	-	»	Закладка и старение	115000	1400-1500	4
β-сплавы												
4201	-	-	-	33	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 27

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	0,15	0,05	0,015	0,30

Таблица 28

Механические свойства при комнатной температуре
титановых литейных сплавов системы

Марка сплава	Вид полуфабриката	Состояние	E	σ _{пц}	σ _{0,2}	σ _в	δ ₁₀	ψ	KCU ,	НВ* (Ø от.п.), мм
			кгс / мм ²				%		кгс / мм ²	
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	85	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

*НВ в кгс / мм²

Таблица 30

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 гарнисажная 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 31

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	»	650	1...2	На воздухе или в нейтральной среде

Таблица 32

Некоторые технологические и физические характеристики титановых и литейных сплавов и их применение

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 и 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

4.4. 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 $\text{Ni}_3(\text{Mo}, \text{Cr})_3\text{C}$, карбонитриды;
- сплавы с интерметаллидным упрочнением.

Высокие характеристики жаропрочности достигаются образованием в них упрочняющей α' -фазы (γ' -фазы) типа $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$, 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 $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$.

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. 33-36).

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		
		σ_b , кгс/мм ²	δ , %	KCU, кгс/мм ²	температура испытания, °C	постоянно приложенное напряжение, кгс / мм ²	время до разрушения, ч
ЖСЗ-ВИ	Нагрев 7 ч при 1150±10°C, охлаждение на воздухе.	-	-	-	800	25	40
ЖСЗДК-ВИ	Нагрев до 1210±15°C, выдержка 3-4 ч, охлаждение на воздухе.	95	7	3	850	35	50
ЖС6К-ВИ	Нагрев до 1210±15°C, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе.	-	-	-	975	20	50
ЖС6У-ВИ	Нагрев до 1210± 10°C. 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°C, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе.	85	5	-	975	20	40
ВЖЛ12Э-ВИ	Без термообработки или по режиму: нагрев до 1210±10°C, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе.	85	5	-	975	20	40
ВЖЛ14Н-ВИ	Нагрев до 1210±10°C, выдержка 3 ч, охлаждение на воздухе. Старение при 700±10°C, 16 ч охлаждение на воздухе	85	9	4	600	60	10
ВХЛ-ВИ	Закалка с 1160±10°C, выдержка 3 ч, охлаждение на воздухе. Старение при 950±10°C, 2 ч охлаждение на воздухе	80	5	-	800	18	100
ВЖЛ18-ВИ	Нагрев до 1180±10°C, выдержка 3,5 ч, охлаждение на воздухе. Старение при 950±10°C, выдержка 3,5...4 ч, охлаждение на воздухе	90	2	-	900	24	40

Таблица 35

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...	20...	20...	20...	20...	20...	20...	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
		100	300	500	700	800	900	1000										
ЖСЗ АНВ300	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
	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 36

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 1210...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 (4 ч) на воздухе	Сопловые и рабочие лопатки газовых турбин, цельнолитые роторы и другие детали, работающие до 900°С

4.5. 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, 50Л, 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:

мартенситного класса –

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

40Х9С2Л – жаростойкой;

20Х12ВНМФЛ – жаропрочной;

10Х12НДЛ – кавитационно-стойкой;

мартенситно-ферритного класса –

15Х13Л – коррозионно-стойкой;

ферритного класса –

15Х25ТЛ – коррозионно-стойкой;

аустенитно-мартенситного класса –

08Х14Н7МЛ, 14Х18Н4Г4Л – коррозионно-стойкой;

аустенитно-ферритного класса –

15Х25Н5ТМФЛ, 16Х18Н12С4ТЮЛ – коррозионно-стойкой;

35Х23Н7СЛ, 40Х24Н12СЛ, 20Х20Н14С2Л – жаростойкой;

10Х18Н3ГЗД2Л – кавитационно-стойкой;

аустенитного класса –

07Х18Н9Л, 10Х18Н9Л, 12Х18Н9ТЛ, 10Х18Н11БЛ,

12Х18Н12М3ТЛ, 10Х17Н10Г4МБЛ – коррозионно-стойкой;
 55Х18П4С2ТЛ, 15Х23Н18Л, 20Х25Н19С2Л, 18Х25Ш9СЛ,
 45Х17Г13Н3ЮЛ – жаростойкой;
 35Х18Н24С2Л, 31Х19Н9МВБТЛ, 20Х21Н46В8Л, 12Х18Н12БЛ,
 08Х17Н34В5Т3Ю2Л, 15Х18Н22В6М2Л – жаропрочной;
 110Г13Л, 120ПЗХ2БЛ, 130Г14ХМФАЛ – износостойкой.

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. 37-42.

Таблица 37

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

Марка стали	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Другие элементы
				не более					
15Л	0,12...0,20	0,17...0,37	0,35...0,65	В зависимости от группы отли- вок и футеровки печи (см. табл. 38)		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...0,12 Ti
30ХНМЛ	0,28...0,35	0,17...0,37	0,5...0,8	0,04	0,04	1,3...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 38

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 39

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

Марка стали	Температура термообработки, °С		σ _{0,2}	σ _в	δ ₅	ψ	КСУ, кгс / мм ²
	Нормализа- ция или за- калка	Отпуск	кгс / мм ²		%		
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							
20ГСЛ	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 $A_{с3}$.

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

Таблица 40

**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 температу- рах, °С						Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м · град при температурах, °С					Удельная тепло- емкость С, 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
15Л-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	-	-	-	-	-	-	-	-
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 41

**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		Детали, подвергающиеся ударным нагрузкам, резким изменениям температуры и работающие до 400°С
35Л	1,8...2,2	350		Обычные детали и машины
40Л		-		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.
55Л	-	-		Из многокомпонентных сталей 35ХГСМЛ, 27ХГСНЛ и др. отливают самолетные детали высокой прочности (траверсы, муфты, кронштейны, подкосы и др.)
40ХЛ	-	340		Детали шасси, траверсы, муфты, кронштейны и др.
30ХНМЛ	-	340		Детали и соединительные узлы самолетов и двигателей
30ДХСНЛ	-	300		
35ХМЛ	-	250		
27ХГСНЛ		190		
35ХГСЛ	2,0	Хорошая	Хорошая	Цементируемые детали повышенной прочности
ВКЛЗ	2,0	Удовлетвор.	Удовлетвор.	
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 ВНЛЗ 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 Х17НЗСЛ, 2Х13Л, Х13НЗВФЛ и аустенитного класса Х18Н9БЛ. Состав, свойства и применение высоколегированных сталей приведены в табл. 43-46.

Таблица 44

**Механические свойства при комнатной температуре
высоколегированных сталей со специальными свойствами отливок**

Марка стали	Состояние полуфабриката	Е	σ _в	σ _{0,2}	δ _s (δ ₁₀)	ψ	НВ, D _{отп}	KCU, кгс/см ²
		кгс / мм ²			%			
X18H9БЛ	Закаленные с 1100...1150°С в воде	-	45	20	25	35	5,3...4,8	5
ВНЛ1	Закалка с 1110°С на воздухе, обработка холодом при - 70°С, выдержка 2ч, отпуск при 250...350°С 2ч, отпуск при 250...350°С 1ч, охлаждение на воздухе	-	110	80	15	40	3,2...3,5	5
ВНЛ3	Гомогенизация при 1110+10°С, охлаждение на воздухе; закалка с 970+10°С на воздухе; старение при 460+10°С, 1ч, охлаждение на воздухе	18500	130	95	15	40	2,9...3,2	8
ВНЛ2	Закалка с 1110°С на воздухе, обработка холодом при - 70°С, выдержка 2ч, отпуск при 450°С 2ч, охлаждение на воздухе	-	135	90	10	30	2,9...3,1	4
ЭИ268Л	Закалка с 1050°С в масле, отпуск при 550°С 3ч, охлаждение на воздухе	-	110	90...97	8...19	33...51	3,4	2
X13H3ВФЛ	Закалка с 1050°С в масле или на воздухе, отпуск при 680...720°С	-	90	75	9	30	3,8...3,45	2
X17H3СЛ	Закалка с 1050°С в масле, отпуск при 540...560°С	-	95	75	8	20	3,8 ...3,2	2,5
X24H8M2ДЗГЛ (ВКЛ1)	Закаленный с 1100+20°С в воде	18000	65	40	(18)	50	4,1	12
ВНЛ5	Гомогенизация при 1130°С, охлаждение на воздухе, закалка с 1130°С 3ч, охлаждение на воздухе, обработка холодом при - 70°С 2ч, отпуск при 500°С 2ч, охлаждение на воздухе	18000	150	120	12	30	2,75...3,05	≥4
ВНЛ4	Закалка с 1110°С, охлаждение в воде, старение при 500°С 8ч, охлаждение на воздухе	19000	60...72	40...42	(30...35)	40...58	4,5...4,0	10...15
ВНЛ6	Закалка с 1130+10°С на воздухе, обработка холодом при - 70°С 2ч, отпуск при 480°С 3ч	18500	140	100	15	35	3,2...2,9	5
ЭИ654Л	Закаленный с 1100°С в воде	15500	68	32	(36)	34	-	4
ЭИ48Ш	Закалка с 1140+10°С в воде, старение при 780...820°С 10-14 ч, охлаждение на воздухе	-	85	55	8	8	3,5...3,8	-
ВЖЛ10	Закалка с 1120°С в масле, двойное старение: 1-е при 740°С 16ч, охлаждение на воздухе; 2-е при 630°С 16ч, охлаждение на воздухе	-	85... 95	60...67	10...14	12...18	-	2...5
1Х13Л	Отжиг при 950°С, закалка с 1060°С в воде, отпуск при 750°С	-	56	40	20	50	-	8

Примечание. Вид полуфабриката при испытании механических свойств для деталей марок X18H9БЛ, ВНЛ1, ВНЛ2, ВНЛ3, ВНЛ4, ВНЛ5, ВНЛ6, ЭИ654Л, ВКЛ-1 – отливки, полученные литьем по выплавляемым моделям, и керамические формы; для сталей марок Э48Л и ВЖ-10Л – в песчаные формы; для сталей марок 1Х13Л, Х13НЗВФЛ, Х17НЗСО – по выплавляемым моделям.

Таблица 45

Физические свойства высоколегированных сталей со специальными свойствами для отливок

Марка стали	Плот- ность, кг/м³	Коэффициент термического линейного расширения α ·10⁶, 1/град при температуре, °С												Коэффициент теплопроводности λ, Вт/м ·град при температуре, °С									
		20... 100	20... 200	20... 300	20... 400	20... 500	20... 600	100... 200	200... 300	300... 400	400... 500	500... 600	600... 700	25	100	200	300	400	500	600	700	800	
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	11,6	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	13,8	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	7880	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	22,1	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	-	-	-	

Таблица 46

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 аргонодуговая	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	-	Аргонодуговая 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

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
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, 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 аргоно-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
ВНЛ4	-//-	-//-	1520... 1580	-	-	Дуговая и аргоно-дуговая	-//-	Закалка с 1110+10°С в воде, старение при 500°С 8ч, охлаждение на воздухе	Детали, работающие длительно до 300°С и кратковременно до 500°С
ВНЛ5	Открытые и вакуумные индукционные печи с основной футеровкой	-//-	1520... 1580	2	10	-	-//-	Гомогенизация при 1130-10°С на воздухе, закалка с 1110+10°С на воздухе, обработка холодом при -70°С, отпуск при 480...520°С, охлаждение на воздухе	Детали, работающие кратковременно до 400°С во всех климатических условиях
ВНЛ6	Открытые и вакуумные индукционные печи с основной футеровкой	Хорошая	1530... 1580	-	-	Аргоно-дуговая сварка	Удовлетворительная	Закалка с 1130+10° С на воздухе, обработка холодом при -70°С 2ч, старение при 480°С 3ч, охлаждение на воздухе	Силовые детали, турбоагрегаты, работающие в интервале температур -196 до +500°С

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЭИ654Л	Индукционные печи с основной футеровкой	-/-	1540... 1600	2,5...3	-	Все виды сварки	Высокая в агрессивных средах	Закалка с 1100°С в воде	Детали, работающие в агрессивных средах в интервале температур работы сред (несварные детали). Сварные детали, работающие в атмосферных условиях
ЭИ481Л	Индукционные печи	-/-	1600 ... 1620	2,0... 2,5	-	Контактная сварка	Удовлетворительная	Закалка 1140+10°С в воде или на воздухе, старение при 780...820°С 10-14ч, охлаждение на воздухе	Высокопрочные и жаропрочные детали
ВКЛ10	Вакуумные индукционные печи	-/-	1600 ... 1620	1,5	5,5	Электродуговая сварка	Хорошее сопротивление газовой коррозии	Закалка 1120°С в масле и двойное, старение при 740 и 630°С 16ч, охлаждение на воздухе	Сложные фасонные отливки, работающие до 800°С
1Х13Л	Открытые печи и ЭШП	Хорошая	-	2,5	-	Все виды сварки	Удовлетворительная	Предварительная : отжиг при 860+10°С. Окончательная закалка с 1030+10°С в масле, отпуск при 660... 700°С	Детали, подвергающиеся ударным нагрузкам
Х13НЗВФЛ	Индукционные печи	-/-	-	~2,5	-	-/-	Пониженная под напряжением	Закалка с 1050°С в масле или на воздухе, отпуск при 680...720°С	Турбинные и компрессорные лопатки, работающие до 550°С
Х17НЗСЛ	Индукционные печи и ЭШП	-/-	-	-	-	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
Х24Н8М2ДЗЛ (ВКЛ1)	Индукционные печи с основной футеровкой	-/-	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 временно до 700°С и в морских условиях

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

5. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

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, а также вытяжка из расплава, ВДП полых слитков, прессование слитков из гранул, получение хлопьевидных чешуйчатых металлов и др.

5.1. Плавка в вакууме

Законы термодинамики можно применять только для определения состояния равновесия системы. Они позволяют установить возможность протекания реакции и их конечное состояние.

Правило фаз определяет число фаз, которые могут существовать в равновесии. Оно выражается уравнением $\Phi = K - C + 2$, где Φ – число фаз, K – число компонентов, C – число степеней свободы.

Число компонентов в большинстве металлургических систем равно числу химических элементов.

Степени свободы – это переменные, которые можно изменять, не изменяя числа фаз. Этими переменными являются давление, температура и состав фаз. Таким образом, одной из важнейших переменных является давление, которое определяет число и состав фаз.

Принцип Ле-Шателье сводится к тому, что изменение одной из переменных (температуры или давления), при которых система находится в равновесии, приводит к тому, что система стремится аннулировать это изменение.

Применительно к вакуумной металлургии важность принципа состоит в том, что понижение давления приводит к протеканию тех

реакций, которые вызывают увеличение числа молекул, находящихся в газообразном состоянии.

Изменение свободной энергии и константа равновесия. Вычислить значение свободной энергии F или изменение ее ΔF невозможно. Значение F определяют по отношению к стандартному состоянию. Стандартное состояние – это состояние чистого твердого, жидкого или газообразного вещества при давлении 1 атм.

При этом определяют разность $F - F^0$, т.е. $F - F^0 = RT^* \ln a$, где F^0 – стандартная свободная энергия, a – активность (для стандартного состояния $a=1$).

Для примера рассмотрим реакцию: $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{CO} \rightleftharpoons 3\text{Fe} + 4\text{CO}_2$. Изменение свободной энергии этой реакции

$$\Delta F = 3F_{\text{Fe}} + 4F_{\text{CO}_2} - (F_{\text{Fe}_3\text{O}_4} + 4F_{\text{CO}}).$$

Если реагенты находятся в стандартном состоянии, то

$$\Delta F^0 = 3F_{\text{Fe}}^0 + 4F_{\text{CO}_2}^0 - (F_{\text{Fe}_3\text{O}_4}^0 + 4F_{\text{CO}}^0).$$

Тогда

$$\begin{aligned} \Delta F - \Delta F^0 &= 3(F_{\text{Fe}} - F_{\text{Fe}}^0) + 4(F_{\text{CO}_2} - F_{\text{CO}_2}^0) - (F_{\text{Fe}_3\text{O}_4} - F_{\text{Fe}_3\text{O}_4}^0) - \\ &- 4(F_{\text{CO}} - F_{\text{CO}}^0) = 3RT \ln a_{\text{Fe}} + 4RT \ln a_{\text{CO}_2} - RT \ln a_{\text{Fe}_3\text{O}_4} - 4RT \ln a_{\text{CO}} = \\ &= RT \ln \frac{a_{\text{Fe}}^3 \cdot a_{\text{CO}_2}^4}{a_{\text{Fe}_3\text{O}_4} \cdot a_{\text{CO}}^4}. \end{aligned}$$

Если реакция находится в равновесии, то $\Delta F = 0$, и отношение активностей называют в этом случае константой равновесия K :

$$\Delta F^0 = -RT \ln K.$$

Значения ΔF^0 известны для реакций образования окислов, сульфидов и карбидов, т.е. для простых реакций. В литературе ΔF^0 представлены в виде графиков, таблиц и полуэмпирических уравнений.

Аддитивность изменения свободной энергии позволяет производить расчеты для сложных реакций. Так, для реакции



не приводится значение ΔF^0 , но его можно рассчитать следующим образом:



Тогда для реакции (1)

$$\Delta F^0_{(1)} = 4\Delta F_{(4)} - \Delta F_{(3)} - \Delta F_{(2)}$$

и
$$K_{(1)} = \frac{K_{(4)}^4}{K_{(3)}^4 K_{(2)}}.$$

Значения $\Delta F_{(2)}$, $\Delta F_{(3)}$, $\Delta F_{(4)}$ приводятся в графиках и таблицах [5].

Активность является величиной относительной и поэтому она не поддается измерению. Но активность является функцией концентрации. Для чистых твердых и жидких веществ активность равна 1. В твердых и жидких растворах активность выражается в молярных долях N . Так, для двойного раствора A и B молярная доля A определяется из отношения

$$N_A = \frac{\frac{\% \text{вес} A}{M_A}}{\frac{\% \text{вес} A}{M_A} + \frac{\% \text{вес} B}{M_B}},$$

где M – молекулярный вес.

Активность может быть представлена в виде

$$A = P_A / P_A^0,$$

где P_A – парциальное давление пара вещества A над раствором;

P_A^0 – давление пара чистого вещества.

Если $a_A = N_A$, то такой раствор называется идеальным и он подчиняется закону Рауля, т.е. $P_A = N_A P_A^0$.

Для разбавленных растворов $N_A \rightarrow 0$ и a_A становится все более пропорциональной N_A . Такой раствор отвечает закону Генри.

Для реальных растворов $a_A = f_A N_A$, где f_A – коэффициент активности, который может быть больше или меньше 1. На рис. 13 приведено соотношение между активностями по Раулю и Генри.

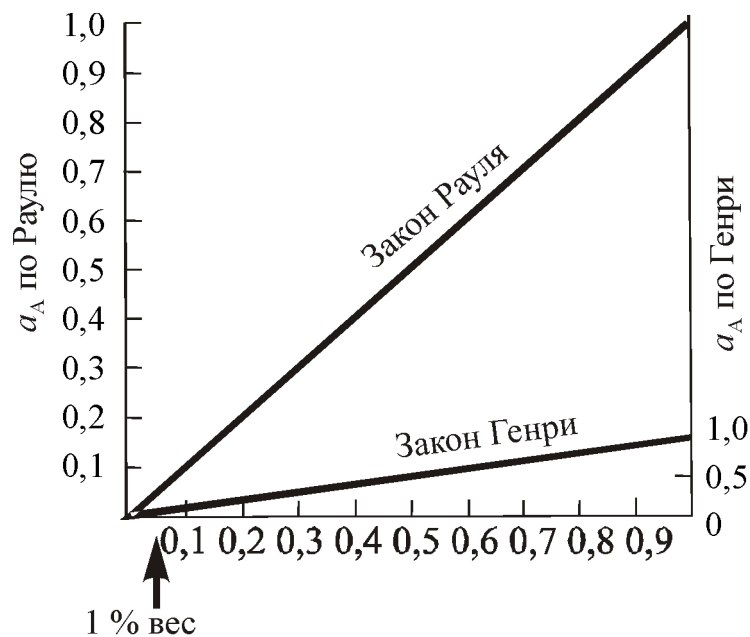
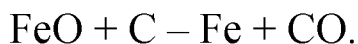


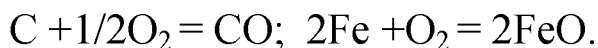
Рис. 13. Соотношение между активностями по Раулю и Генри

Рассмотрим реакции, представляющие наибольший интерес в металлургии.

Реакции газов с твердыми веществами.



Изменение стандартной свободной энергии этой реакции можно вычислить из значений изменения стандартных свободных энергий CO и FeO:



Найдем значения ΔF^0 при температуре 1200°C из таблиц или графиков, приводимых в литературе [5]:

$$\Delta F^0_{\text{CO}} (1200^\circ\text{C}) = -50150 \text{ кал} (210,13 \cdot 10^3 \text{ Дж});$$

$$F^0_{\text{FeO}} (1200^\circ\text{C}) = -80000 \text{ кал} (210,13 \cdot 10^3 \text{ Дж}).$$

Тогда изменение стандартной свободной энергии реакции при 1200°C составит

$$\Delta F^0 = \Delta F_{\text{CO}} - \Delta F_{\text{FeO}} = -50150 + 80000 = 29850 \text{ кал}.$$

Из $\Delta F^0 = -RT \ln K$ найдем

$$\ln K = \frac{-29850}{4,575 \cdot 1200} = -5,45;$$

$$K = \frac{P_{\text{CO}} \alpha_{\text{Fe}}}{\alpha_{\text{FeO}} \alpha_{\text{C}}} = 3,6 \cdot 10^{-6}.$$

Так как активности F_{C} , F_{CO} и C при стандартном состоянии равны 1, то

$$P_{\text{CO}} = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ атм.}$$

Таким образом, в вакуумной печи необходимо поддерживать

$$P = 760 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6} \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт.ст.} = 3,99 \cdot 10^{-1} \text{ Па.}$$

Испарение. При выплавке в вакууме из сплавов испаряются компоненты с высокой упругостью паров. На рис. 14 показана зависимость упругости паров металла от температуры. Для получения парциального давления какого-либо компонента сплава над расплавом необходимо величину p_0 , приведенную на этом рисунке, умножить на активность $P_a = aP_A^0$. Если активность a неизвестна, можно применять приближенно закон Рауля, т.е. активность приравнять к молярной доле $P_A = N_A P_A^0$.

При вакуумной плавке интерес представляют элементы, расположенные левее железа (см. рис.14), особенно Мп и Сг, так как они могут испаряться в процессе плавки.

Максимальная скорость испарения определяется из соотношения

$$W = P_A \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}},$$

где W – максимальная скорость испарения, (г/см²)/с;

P_A – давление пара, дин/см²;

M – молекулярный вес, г;

R – газовая постоянная, $8,3 \cdot 10^7$ (эрг/моль)/град;

T – температура, К.

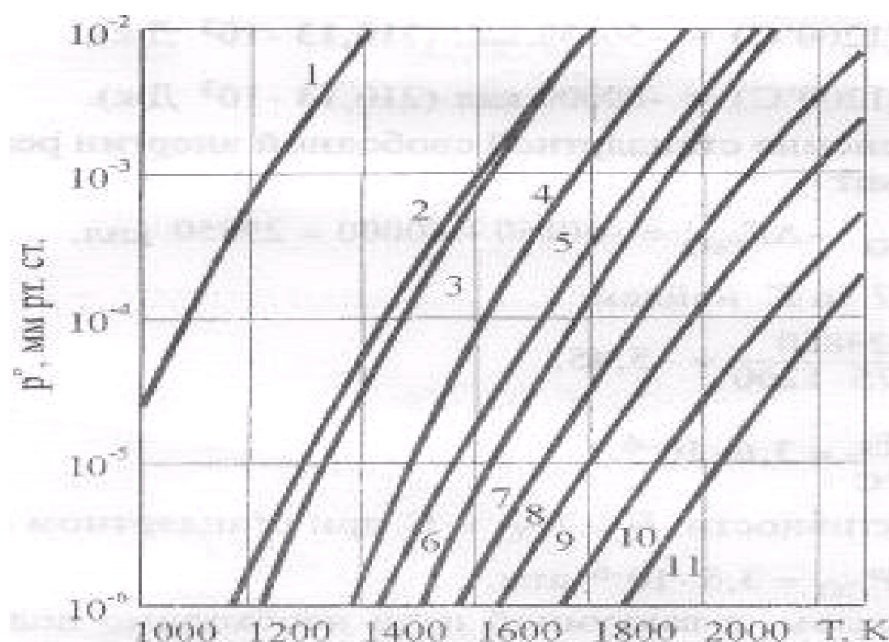


Рис. 14. Изменение давления пара металлов в зависимости от температуры:
1 – Pb; 2 – Mn; 3 – Ag; 4 – Cr; 5 – Sn; 6 – Cu; 7 – Si; 8 – Fe; 9 – Ni; 10 – CO;
11 – Ti

Для определения скорости испарения компонентов сплава при вакуумной плавке необходимо в соотношение подставить не упругость пара, а парциальное давление $P_A = \alpha P^\circ_A$.

Десульфурация. При вакуумной плавке сера может удаляться в виде соединений с водородом и кислородом. Так, для железа и его сплавов возможны следующие реакции:

$$[S] = \frac{1}{2} S_{2 \text{ газ}}, \quad K = \frac{P_{SO_2}^{1/2}}{a_S} = 2,95 \cdot 10^{-3} \quad (\text{при } 1600^\circ\text{C});$$

$$[S] + 2[O] = SO_{2 \text{ газ}}, \quad K = \frac{P_{SO_2}}{a_O^2 \cdot a_S} = 2,6 \cdot 10^{-3} \quad (\text{при } 1600^\circ\text{C});$$

$$H_{2 \text{ газ}} + [S] = H_2S_{\text{газ}}; \quad K = \frac{P_{H_2S}}{P_{H_2} \cdot a_S} = 2,6 \cdot 10^{-3} \quad (\text{при } 1600^\circ\text{C}).$$

Для проведения активной десульфурации можно применять металлические десульфураторы, например кальций и церий:

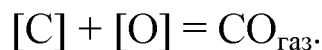
$$CeS = [Ce] + [S]; \quad K = [\% Ce]. \quad [\% S] = (1,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-3} \quad (\text{при } 1600^\circ\text{C}).$$

Если в ванну ввести 0,3% церия, то она будет находиться в равновесии при 0,005% серы. Главным недостатком металлических десульфураторов является загрязнение металла сульфидами.

Раскисление. При вакуумной плавке снижение концентрации кислорода в металле может быть достигнуто следующими путями.

1. *Взаимодействие с углеродом.* Сплавы, содержащие углерод, могут быть хорошо раскислены в вакууме.

Допустим, сталь содержит 0,2% С и остаточное давление составляет 10^{-5} атм. Раскисление углеродом идет по реакции



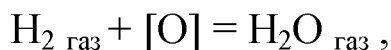
Константа равновесия этой реакции

$$K = \frac{P_{CO}}{[\%O][\%C]}.$$

При 1600 К = 420. Тогда

$$[\%O] = P_{CO} / K [\%C] = 10^{-5} / 420 \cdot 0,2 = 1,2 \cdot 10^{-7}.$$

2. *Восстановление водородом.* Раскисление водородом идет по реакции



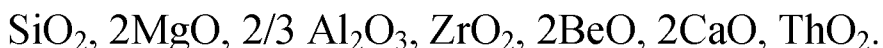
$$K = \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2} \cdot [O]}.$$

Так как содержание остаточного кислорода в металле зависит от отношения H_2O / H_2 , вакуум не оказывает влияния на раскисление. Но пониженное давление необходимо для удаления остаточного водорода после раскисления и для предотвращения вторичного окисления металла до конца плавки. Раскисление водородом имеет преимущества, так как не требует внесения в ванну углерода и других раскислителей.

3. *Раскисление элементами с большим сродством к кислороду.* Лучше всего использовать для этой цели элементы, являющиеся легирующими компонентами данного сплава, например титан или цирконий для большинства жаропрочных сплавов.

Взаимодействие металла с огнеупорами. Наличие низких давлений значительно облегчает взаимодействие окислов огнеупоров с активными элементами расплава.

Чистые окислы, которые могут входить в состав огнеупорных материалов, по величине стандартной свободной энергии их образования на 1 моль O_2 можно расположить в ряд:

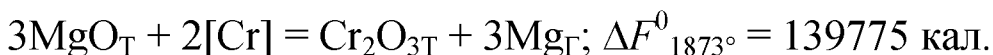
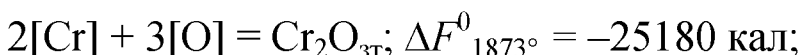
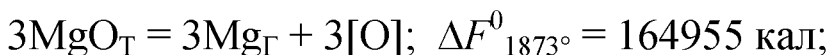


В верхних рядах расположены легко восстанавливаемые окислы. При вакуумной плавке могут быть восстановлены окислы огнеупора такими элементами, как Ti и Al. Окислы, находящиеся в растворе, могут также восстанавливаться углеродом с образованием CO. Окись магния MgO восстанавливается с образованием газообразного Mg. Так, реакция $2/3 Al_2O_3 + [Ti] = 4/3 [Al] + TiO_2$ может протекать и в вакууме, и при атмосферном давлении. Но при высокой температуре Al имеет заметную упругость пара (при $1600^\circ C$ она составляет 4,6 мм рт.ст.).

Наиболее широко выплавляют в вакууме сплавы, содержащие хром. Поэтому рассмотрим взаимодействие хрома, растворенного в металле, с глиноземом и окисью магния.

В случае магнезитовой футеровки может идти реакция

$3MgO_T + 2[Cr] = Cr_2O_{3T} + 3Mg_G$. Для расчета рассмотрим реакции:



Константа равновесия данной реакции равна

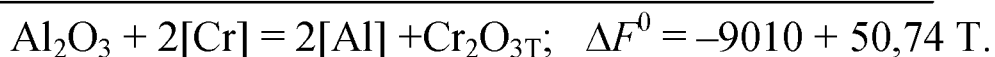
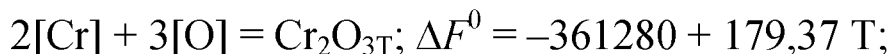
$$K = P^3_{Mg} / [\%Cr]; \quad \ln K = -\frac{\Delta F^0_{1873}}{RT} = -\frac{139775}{4,576 \cdot 1873}.$$

Таким образом, $K = 5 \cdot 10^{-17}$ и $P_{Mg} = \sqrt[3]{[\%Cr] \cdot 5 \cdot 10^{-17}}$.

Так, при 18% Cr в стали получаем $P_{Mg} = 0,02$ мм рт.ст.

Полученное значение упругости пара магния говорит о том, что металл может загрязняться окислами хрома, а содержание кислорода будет возрастать.

Можно провести аналогичные расчеты для глинозема:



При 1873 K $\Delta F^0_{1873^\circ} = 85990$ кал. Тогда

$$K = -\frac{\Delta F^0_{1873}}{RT} = -\frac{85990}{4,576 \cdot 1873}; \quad K_{1873} = 10^{-11}.$$

Константа равновесия реакции

$$K = a^2_{\text{Al}} / a^2_{\text{Cr}}.$$

Дальнейшие расчеты показывают, что при выплавке в вакууме стали с 18% Cr в металле может появиться 0,000174% Al.

Процессы дегазации. Удаление газов из металла является одной из задач вакуумной плавки. Только в вакууме можно обеспечить содержание водорода 0,0001-0,0002%, кислорода 0,0002-0,001%, азота 0,005-0,1%.

Удаление кислорода в вакууме может происходить из жидкого металла за счет всплывания окислов, удаления пузырьков СО (при взаимодействии углерода, растворенного в металле, с кислородом) и испарения летучих субокислов. Субокислы представляют собой наименее окислы элементов, обладающие высокой упругостью пара.

Удаление азота и водорода из жидкого металла при выплавке в вакууме может происходить в следующих случаях:

- 1 – выделение пузырьков азота и водорода (при их высоком содержании в металле);
- 2 – всплытие нитридных и гидридных фаз в случае их образования;
- 3 – десорбция газа с поверхности ванны.

Основной причиной удаления газов из металла в вакууме является подчинение растворов азота и водорода в жидком металле закону Генри.

Частичным случаем этого закона является закон Сиверста, согласно которому

$$[\%N] = K_N \sqrt{P_{N_2}}; \quad [\%H] = K_H \sqrt{P_{H_2}},$$

где K_N и K_H – растворимость азота и водорода в сплаве при данной температуре и парциальном давлении P_{N_2} и P_{H_2} , равном 1 атм.

5.2. Обработка расплавов

С целью повышения качества металла разработаны специальные методы. Все они основаны на применении следующих приемов: обработка металла вакуумом и специальными шлаками, продувка расплава инертными газами и порошкообразными материалами. Для этого разработаны и широко применяются переплавные процессы и внепечная обработка металла.

Обработка металлов вакуумом. Вакуум влияет на протекание реакций и процессов, в которых принимает участие газовая фаза. В стали практически всегда содержится углерод. В вакууме резко возрастает раскислительная способность углерода, так как реакция $[C] + [O] = CO_{\text{газ}}$ сдвигается вправо.

Константа равновесия этой реакции:

$$K_p = \frac{P_{CO}}{a_C a_O}; \quad a_O = \frac{P_{CO}}{a_C K_p},$$

т.е. уменьшение P_{CO} приводит к снижению количества кислорода в металле.

Если кислород находится в виде оксидных неметаллических включений, то снижение давления приводит к частичному или полному разрушению этих включений:

$$(MeO) + [C] = [Me] + CO_{\text{газ}}; \quad K_p = \frac{P_{CO} \cdot a_{Me}}{a_{MeO} \cdot a_O}; \quad a_{MeO} = \frac{P_{CO} \cdot a_{Me}}{K_p \cdot a_C}.$$

При обработке вакуумом удаляются также водород и азот. Известно, что

$$[H] = K \sqrt{P_{H_2}}.$$

В вакууме реакция $2[H] \rightleftharpoons H_{2 \text{ газ}}$ сдвигается вправо и поэтому водород удаляется из металла. Важно учесть, что водород обладает

большой подвижностью (большой коэффициент диффузии водорода в жидком железе ($D_H = (1,2-1,5) \cdot 10^{-3}$ см/с).

Равновесие реакции $2[N] \rightleftharpoons N_{2 \text{ газ}}$ сдвигается в вакууме вправо, и азот удаляется из металла. Но подвижность азота меньше, чем у водорода ($D_N = (1-4) \cdot 10^{-4}$ см/с), поэтому требуются более глубокий вакуум и большая выдержка в вакууме.

Кроме того, в выделившихся пузырьках CO, как в вакууме (в них парциальные давления азота и водорода равны нулю, т.е. $P_{H_2} = 0$ и $P_{N_2} = 0$), растворяются азот и водород и удаляются вместе с CO. При этом выделяющиеся пузырьки газов перемешивают расплав и гомогенизируют его.

В вакууме испаряются также примеси легкоплавких цветных металлов (Pb, Sb, Zn, Sn и др.), которые резко ухудшают свойства сплавов, особенно жаропрочных.

Надо иметь в виду, что из-за высокой раскислительной способности в вакууме углерод взаимодействует с материалом тигля и восстанавливает окислы тигля, которые переходят в металл. Поэтому при вакуумной плавке очень важен вопрос выбора материала тигля.

Продувка металла инертными газами. При продувке жидкий металл пронизывают пузырьки инертного газа (чаще всего аргона). В этих пузырьках парциальные давления водорода и аргона равны нулю, поэтому, как в вакууме, в пузырьках инертного газа растворяются азот и водород и удаляются из металла.

Продувка газом перемешивает сплав и усредняет его химический состав. Важно также, что при этом облегчается удаление неметаллических включений в шлак. Необходимо иметь в виду, что продувка жидкого металла газом снижает температуру расплава.

При производстве простых марок сталей аргон заменяют более дешевыми газами (азот, пар).

Продувка металла порошкообразными материалами. Порошкообразный материал вводится в расплав газом-носителем. Газом-носителем может быть окислитель (кислород, воздух), восстановитель (природный газ) и нейтральный газ (аргон).

Для удаления фосфора в металл вдувают в струе кислорода смесь, состоящую из извести, железной руды и плавикового шпата. Для удаления серы в струе аргона вдувают смесь извести и плавикового шпата. Этим способом вводят в металл легирующие добавки,

которые нельзя вводить обычным способом из-за пироэффекта (Ca, Mg) или вредного действия на здоровье рабочего (Pb, Se, Te).

5.3. Переплавные процессы

Спецпереплавку подвергают слитки и заготовки, полученные обычными способами (конвертер, мартен, электропечь). К переплавным процессам относят вакуумный индукционный (ВИП), вакуумный дуговой (ВДП), электрошлаковый (ЭШП), электронный лучевой (ЭЛП) и плазменный дуговой (ПДП) переплавы.

Вакуумный индукционный перелав (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. В качестве примера на рис.15 приведена схема печи полунепрерывного действия.

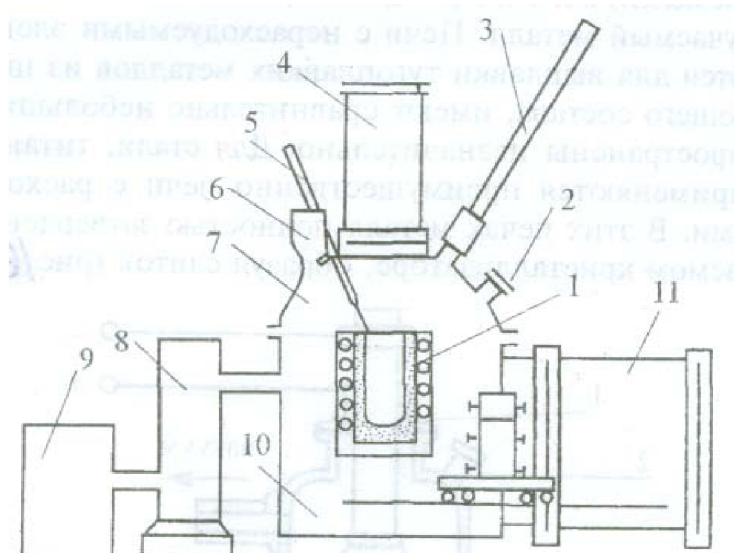


Рис. 15. Схема печи ОКБ571Б: 1 – тигель; 2 – гляделка; 3 – термопара; 4 – камера загрузки шихты; 5 – ломик для осаживания шихты; 6 – дозатор; 7 – съемная крышка; 8 – бустерный насос; 9 – форвакуумный насос; 10 – камера; 11-камера охлаждения

Для загрузки шихты без нарушения вакуума печь оборудуется загрузочной шлюзовой камерой, расположенной над плавильной и отделяемой вакуумным технологическим затвором.

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 донышками. 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, донышки 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, ти-

тана и ряда сплавов применяются преимущественно печи с расходуемыми электродами. В этих печах металл полностью затвердевает в водоохлаждаемом кристаллизаторе, образуя слиток (рис.16).

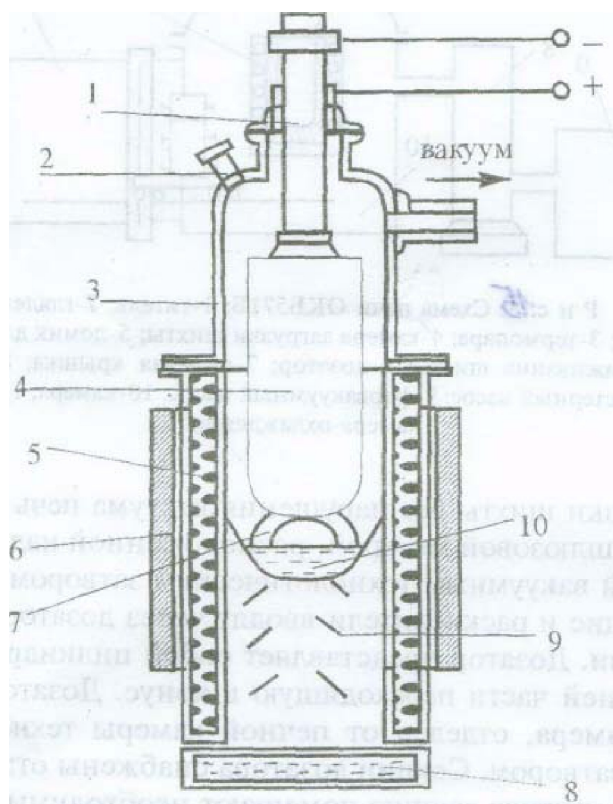


Рис. 16. Вакуумная дуговая печь: 1 – штوك; 2 – гляделка; 3 – крышка; 4 – расходуемый электрод; 5 – кристаллизатор; 6 – соленоид; 7 – электродуга; 8 – поддон; 9 – слиток; 10 – ванна жидкого металла

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 дуга электрическая, 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. Схема принципиальной установки показана на рис. 17.

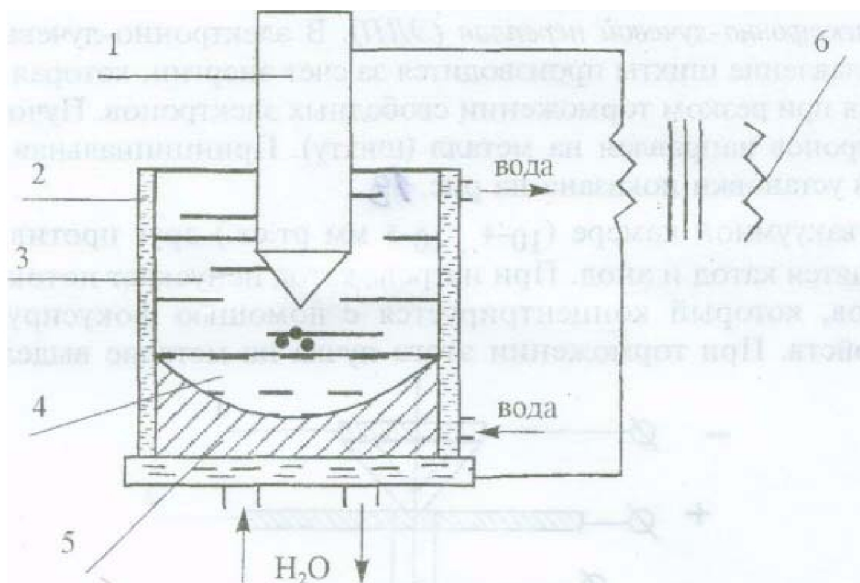


Рис. 17. Схема ЭШП: 1 – расходный электрод; 2 – кристаллизатор; 3 – шлак; 4 – ванна металла; 5 – слиток; 6 – источник питания

Суть способа состоит в следующем. При прохождении переменного тока через слой шлака с большим электросопротивлением выделяется тепло, которое расплавляет расходный 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). Принципиальная схема такой установки показана на рис. 18.

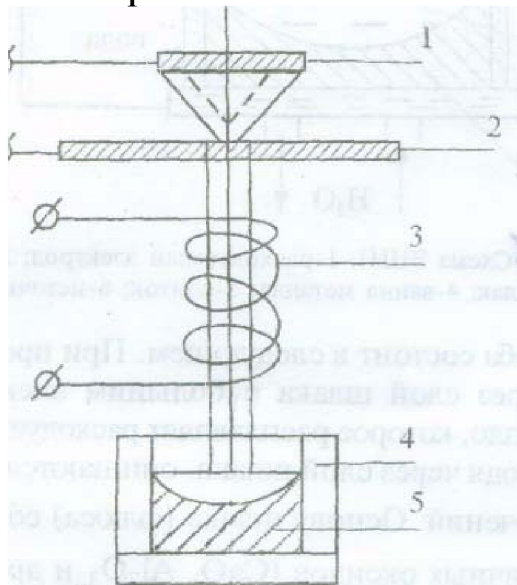


Рис. 18. Схема ЭЛП: 1 – катод; 2 – анод; 3 – фокусирующее устройство; 4 – кристаллизатор; 5 – слиток

В вакуумной камере ($10^{-4} \dots 10^{-5}$ 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.

5.4. Внепечная обработка

Обработка стали синтетическими шлаками производится с целью раскисления и десульфурации. Способ предложен в СССР А.С. Точинским (1925 г.) и во Франции Р. Перреном (1933 г.). Сущность способа состоит в том, что сталь с большой высоты выпускают в ковш, в который предварительно залит шлак. При этом шлак перемешивается со сталью, образуя эмульсию. Контактная поверхность шлака и металла резко возрастает, и процессы раскисления и обессеривания идут во много раз быстрее, чем в печи. В состав шлака входят CaO и Al_2O_3 . Температура шлака 1650-1700°C.

Сталь, подлежащую обработке, подвергают сокращенной обработке в мартене, конверторе или электрической печи, состоящей в расплавлении, доводке (легировании) и удалении плавильного шлака. За счет сокращения времени плавки производительность агрегатов увеличивается примерно на 15%.

Указанный способ позволяет увеличить производительность плавильных агрегатов, уменьшить в 2-3 раза содержание серы, а также газов и неметаллических включений.

Внепечное вакуумирование осуществляется различными способами: в ковше, порционный, циркуляционный, в струе металла и др. На рис.19 приведены два способа внепечного вакуумирования: в ковше и в струе металла.

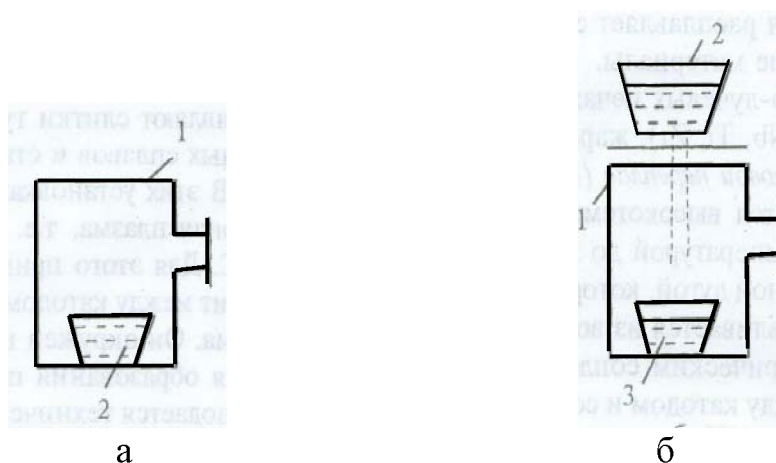


Рис.19. Схемы способов внепечного вакуумирования: а – в ковше; б – в струе металла; 1 – вакуумная камера; 2 – ковш с металлом; 3 – ковш для вакуумированного металла

6. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАВКИ И ЛИТЬЯ

6.1. Выбор состава сталей и сплавов

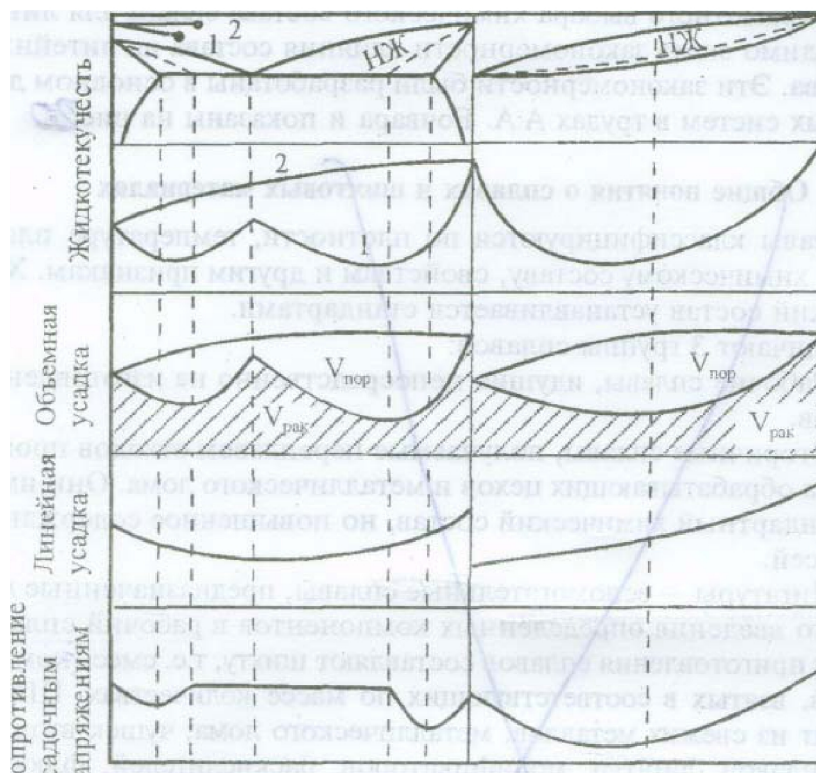
По технологическим признакам все стали и сплавы обычно разделяют на две группы: литейные и деформируемые. Деформируемые сплавы идут для изготовления слитков (заготовительное литье), которые затем подвергаются различным видам пластической деформации. Литейные сплавы предназначены для изготовления фасонных отливок (фасонное литье).

В основе выбора состава сталей и сплавов лежит необходимость сочетания высоких механических, технологических и эксплуатационных характеристик изделия. К литейным маркам сплавов предъявляются высокие требования по жидкотекучести, усадке, ликвационным явлениям и трещиностойкости. Деформируемые сплавы должны характеризоваться высокой способностью к пластической деформации. Сочетание прочности и пластичности характерно для однородных твердых растворов. Но такие сплавы имеют низкие литейные свойства, поэтому они применяются преимущественно как деформируемые. Литейные сплавы – это многофазные сплавы с узким интервалом кристаллизации, главным образом эвтектического типа. Для них характерны пониженная пластичность и хорошие литейные характеристики.

Для грамотного выбора химического состава сплава для литья необходимо знать закономерности влияния состава на литейные свойства. Эти закономерности были разработаны в основном для двойных систем в трудах А.А. Бочвара и показаны на рис. 20.

6.2. Общая характеристика и отечественная классификация отливок

Отливки должны иметь заданный химический состав, необходимый уровень физико-химических характеристик, требуемую размерную точность и соответствующую чистоту поверхности. Для этого применяют различные способы литья, технические возможности которых для цветных сплавов (без стального и чугуна литья) приведены в табл. 47.



Составы сплавов

Рис. 20. Зависимость литейных свойств от состава сплава: 1 – жидкотекучесть при постоянном перегреве выше температуры ликвидуса; 2 – жидкотекучесть при постоянной температуре заливки; $V_{\text{пор}}$ – объем усадочных пор; $V_{\text{рак}}$ – объем усадочных раковин; НЖ – температура нулевой жидкотекучести

В зависимости от требований отливки разделяются на три группы:

1 – отливки общего назначения. Детали этой группы отливок не рассчитываются на прочность, конфигурация и размеры отливок определяются только конструктивными и технологическими соображениями.

2 – отливки ответственного назначения. Детали рассчитываются на прочность, работают при статических нагрузках.

3 – отливки особо ответственного назначения. Рассчитываются на прочность и работают при циклических и динамических нагрузках.

В зависимости от объема приемосдаточных испытаний отливки делятся также на три группы:

1 – отливки, контроль механических свойств которых производится выборочно на образцах, вырезанных из тела контрольных отливок, с одновременным испытанием механических свойств на отдельно отлитых образцах (от каждой плавки или поштучно).

2 – отливки, механические свойства которых определяют на отдельно отлитых образцах, вырезанных из прилитых к отливке заготовок и по требованию завода-заказчика на образцах, вырезанных из заготовок (выборочно, поштучно).

3 – отливки, в которых контролируют только твердость и по требованию завода-заказчика производится контроль механических свойств на отдельно отлитых образцах.

В зависимости от способа литья, конфигурации, массы, размера, толщины стенок, характеристики выступов, отверстий, ребер, утолщений, числа стержней, особых технических условий отечественными нормами предусмотрено деление отливок на 5-6 групп сложности (литье в кокиль, по выплавляемым моделям и в оболочковые формы – 5 групп, литье в песчаные формы под давлением – 6 групп). Группы сложности определяются по наибольшему числу признаков [6].

6.3. Способы литья

Фасонные отливки получают практически любыми способами. Выбор способа определяется требованиями, предъявляемыми к отливкам, техническими возможностями способа литья, экономическими соображениями. Основным этапом литейного производства является процесс изготовления литейной формы, называемый формовкой. Различают формовку ручную и машинную. Формы отличаются материалом, методами формовки, долговечностью, чистотой поверхности.

В зависимости от долговечности формы делят на разовые (песчано-глинистые, песчано-смоляные, изготовленные по выплавляемым моделям, растворяемым и газифицируемым – выжигаемым моделям), которые разрушают после получения одной плавки, и многократно используемые (металлические), снижающие припуск на механическую обработку с 15-25% (для песчано-глинистых форм) до 5-7%. Отверстия в отливках получают с помощью фасонных вставок – стержней.

Заливка жидкого металла в форму чаще всего производится через специальную систему каналов, называемую литниковой системой. Она состоит из литниковой чаши, а также стояка, шлакоулови-

телей и питателей со строго определенным соотношением их сечений.

Литье в песчаные формы. Литейные формы и стержни изготавливают из огнеупорных кварцевых песков (ГОСТ 2138-74), связующих формовочных глин (ГОСТ 3226-76) и вспомогательных материалов (противопригарных, газотворных и т.д.). Полость формы изготавливают с помощью приспособлений, называемых моделью (деревянных, металлических). Стержни готовят в специальных стержневых ящиках. Состав формовочных и стержневых смесей зависит от природы сплавов, характера форм (сухая, сырая), режимов заливки жидкого металла, серийности производства.

Различают смеси: а) облицовочные – с повышенным количеством свежих песков и глин; б) наполнительные – содержат до 40% оборотной смеси; в) единые, применяемые в массовом производстве; г) стержневые; д) специальные. В них кварцевый песок заменен более огнеупорным материалом (хромит, циркон), а связующим является жидкое стекло.

Различают жидкоподвижные самотвердеющие смеси (ЖСС), холоднотвердеющие смеси (ХТС) и пластичные самотвердеющие смеси (ПСС).

Литье в оболочковые формы. Формовочная смесь состоит из мелкозернистого кварцевого песка (хромита, циркона) и 3-7% терморезактивной фенольно-формальдегидной смолы со специфическими свойствами: при комнатной температуре – это порошок; при нагреве до 70-120°C смола становится полужидкой, клеей; при дальнейшем нагреве до 200-250°C она необратимо твердеет. Оболочковые полуформы изготавливают на карусельных автоматах бункерным способом по горячим металлическим моделям ($t_{\text{мод}} = 200-250^\circ\text{C}$).

При попадании на модель формовочная смесь первоначально растекается по ней, а затем образует эластическую оболочку, четко воспроизводя конфигурацию модели. Готовую полуформу снимают через 10-30 с. Ее окончательное отверждение происходит в электропечи при $t = 350-450^\circ\text{C}$ в течение 1,5-2,0 мин. Полученную форму путем склеивания терморезактивным клеем двух полуформ устанавливают в металлические коробки, уплотняют песком или дробью и

подают на заливку. Литниковые системы и режимы заливки аналогичны литью в песчаные формы. После затвердевания отливки формы разрушают. Весь процесс изготовления отливки длится 3-4 мин. Сложные отливки необычно точны (5-7) класс, имеют высокие физико-механические свойства и чистоту поверхности (6-4 кл.). Толщина – 3-15 мм, вес – 0,25-100 кг.

Подобным образом изготавливают и оболочковые стержни по горячим стержневым ящикам. Их используют для получения сложных полостей при литье в постоянные металлические формы, оболочковые и т.д., применяемые для изготовления изделий авиационной промышленности.

Точное литье по выплавляемым, растворяемым и выжигаемым моделям. По выплавляемым моделям отливают сотни деталей самолетов и двигателей: форсунки, лопатки турбин и компрессоров, кронштейны, штурвалы, качалки, крыльчатки, детали контрольно-измерительных приборов.

Способ трудоемок и дорог, но себя оправдывает, так как получают сложные, тонкостенные ($S_{ст} = 0,3-3,0$ мм) отливки из высоколегированных и труднообрабатываемых сплавов массой 0,02-300 кг с отверстиями в любом направлении, с большой точностью (4-7 кл.) и высокой чистотой поверхности (4-6 кл.) с минимальными отходами в стружку.

В настоящее время существуют многочисленные варианты технологических процессов получения прецезионных изделий и рецептов модельных и огнеупорных формовочных материалов. Но обязательно материал при всех вариантах должен обладать или невысокой температурой плавления (воск, парафин, стеарин, церезин, канифоль), или способностью легко растворяться в горячей воде (например, карбамид), или сгорать без образования твердых остатков (например, полистирол, получаемый полимеризацией стирола).

По чертежу детали изготавливают одно- или многоместные разборные пресс-формы для получения в них моделей, отливок и моделей литниковой системы из вышеперечисленных материалов, которые затем собирают в блоки. Составы модельных смесей зависят от назначения, формы и размера деталей. Модельная масса запрессовывается или свободно заливается в пресс-формы.

Затем формируют керамическую огнеупорную оболочку путем окунания блоков моделей в вязкую суспензию, состоящую из гидролизованного этилсиликата и маршалита, немедленного обсыпания сухим зернистым материалом (маршалит, циркон, электрокорунд), подсушивания каждого слоя. Таких слоев наносят до 10-13, а сушку ведут в аммиачном шкафу в течение 30 мин. Далее горячей водой или паром удаляют модельную массу, а керамическую форму прокаливают в электропечах в течение 3-8 ч при температуре 900-1000°C. Для придания большей прочности при заливке керамической формы расплавленным металлом ее автоматически засыпают сухим песком в металлической коробке. После затвердевания сплава отливка легко выбивается.

Выжигаемые модели получают путем запрессовки сферических или чечевицеобразных гранул пенополистирола (суспензионного бисера с плотностью 0,64 г/см³) в полость подогреваемой металлической пресс-формы сложного профиля и вспенивания их теплом горячей воды, пара и ТВЧ. Гранулы расширяются и сплавляются между собой, образуя плотную структуру как модели отливки, так и модели литниковой системы.

Для повышения чистоты поверхности моделей их покрывают тонким слоем воска и противопригарной краски и сушат 4-6 ч при $t \leq 65^\circ\text{C}$. Склеенные блоки моделей устанавливают в металлические опоки, уплотняют вокруг них кварцевый песок методом вакуумирования и тут же заливают жидкий металл. В процессе спокойной автоматизированной заливки полистироловая модель газифицируется (выжигается), а образовавшаяся при этом полость литейной формы заполняется сплавом.

Отверстия в отливках получают без стержней, возможно получение резьбовых отверстий. Цикл изготовления моделей 10 с на один сантиметр толщины плюс время прогрева пресс-формы. Срок службы пресс-формы неограниченный.

Литье в кокиль. Кокиль – это металлическая литейная форма. Данный способ позволяет получать герметичные, с высокими механическими свойствами отливки 4-6 класса точности, с шероховатостью $R_z = 50-20$ и минимальной толщиной стенок 0,5-4,0 мм. В массовом и серийном производстве используют карусельные 6-20-пози-

ционные кокильные машины. Скорость формирования отливок из свободно заливаемого жидкого металла в 3-10 раз выше, чем в песчаных формах. Сложные внутренние полости в отливках получают с помощью оболочковых, песчаных и составных из 3-5 частей металлических стержней. Основной дефект литья – трещины, обусловленные затрудненной усадкой. При литье в кокиль применяют расширяющиеся литниковые системы с сифонным, вертикальным и ярусным подводом металла при соотношении площадей сечений элементов литниковой системы $F_{\text{ст}}:F_{\text{шл}}:F_{\text{лит}}=1:2:3$ – для мелких отливок и $F_{\text{ст}}:F_{\text{шл}}:F_{\text{лит}}=1:3:6$ – для крупных. Скорость поступления расплава в полость формы ограничивают применением изогнутых стояков, сеток из стеклоткани или зернистых фильтров.

Литьем в кокиль изготавливают поршни и детали реактивных двигателей, корпусные детали самолетов, приборов.

Литье под давлением. Это наиболее прогрессивный способ получения точных отливок в массовом производстве. Данный способ позволяет изготавливать фасонные, тонкостенные ($S_{\text{ст}} \leq 0,5-2,0$ мм) высокой точности (3-5 кл.) и чистоты поверхности (8-5 кл.) отливки; литую резьбу, армированное литье; отверстия диаметром 1,5 мм на глубину 4-5 диаметров. Это детали радиоаппаратуры, электронно-измерительных приборов, корпуса приборов и агрегатов. Использование давления (до 300 МН/м^2) при формировании отливок в сложных разъемных пресс-формах, состоящих из 30-100 частей, упрочняет металл и повышает его качество. Стоимость пресс-форм в 3-5 раз выше, чем кокилей. Пресс-формы изготавливают из дорогостоящих легированных инструментальных сталей, подвергают их термической обработке с последующей ХТО. Так как скорость формирования отливок составляет 0,5-120 м/с за время $T = 0,7-0,8$ с, то газы из пресс-формы выделиться не успевают и отливки имеют низкую плотность. Термической обработке отливки не подвергают из-за газовой пористости. Вес отливок – менее 50 кг. Песчаные стержни не применяют. Изготовление отливок ведут на машинах прессового действия с горячей вертикальной и холодной (вертикальной и горизонтальной) камерами сжатия при удельном давлении $P = 30-70$ МПа. Существенное повышение плотности отливок достигается ва-

куумированием полости пресс-форм, применением "кислородного процесса" (способ А.А. Рыжикова).

Центробежное литье. Суть способа состоит в заливке жидкого металла во вращающиеся вокруг вертикальной или горизонтальной оси формы. Способ отличается хорошим заполнением. Утяжеление частиц сплава под действием центробежных сил, отбрасывающих металл к стенкам формы, способствует получению плотных отливок, направленному затвердеванию, высокому классу точности (5-7 кл.) и чистоте поверхности (6-4 кл.). Путем последовательной заливки разнородных металлов получают биметаллические отливки. Ценнейшее свойство биметаллов – прочность в сочетании с легкостью, антикоррозийностью, тепло- и вибростойкостью, что важно в реактивной и авиационной технике, химии, приборостроении. Вторым сплав заливают, когда почти полностью закончено затвердевание первого. Но центробежным литьем невозможно получать отверстия и качественные отливки из ликвирующих сплавов.

Формы, используемые при центробежном литье, подразделяются по материалу на разовые (песчаные, оболочковые, по выплавляемым моделям и др.) и многократные (металлические). Карусельные установки по конструкции исполнения подразделяются на шпиндельные (когда масса отливок ограничена) и роликовые (для отливок большой массы и размеров).

Литье "выжиманием". Применяется для получения на автоматических установках крупногабаритных, плотных, прочных, сложных, мелкозернистых отливок (размерами 1000-3000 мм) в виде тонкостенных сплошных и пустотелых панелей ($S_{ст} = 2-5$ мм) для авиационной промышленности: плоскости крыла, отсеки фюзеляжа, корпуса ракет, стабилизаторы. Матрица литейной установки состоит из двух полуформ, соединенных шарнирно, одна из которых подвижна. Полуформы в раскрытом состоянии образуют металлоприемник, заполнение ведется сплошным потоком. Отливка формируется при повороте подвижной полуформы в сторону неподвижной путем сжимания жидкого металла. Первоначально на стенках формы образуются твердые корки, которые затем соединяются в отливку. Захлопывание полуформ происходит аналогично процессу литья под давлением. Для получения полых деталей используют оболочковые

или песчаные стержни. Избыток жидкого металла вынимается из формы в приемный ковш (с окислами и газами). Литье "выжиманием" эффективнее литья в кокиль. Возможно и плоскопараллельное перемещение полуформ.

6.4. Принципы разработки технологии плавки

В основе технологии лежат температурный режим плавки, порядок загрузки компонентов шихты и металлургическая обработка расплава. Температурный режим определяется природой сплава. Исходя из температуры плавления подбирается тип печи. Плавку ведут всегда в разогретой печи.

Обычно температура печи на 100-200°-С выше температуры плавления основного компонента сплава. Для удаления влаги шихтовые материалы нагревают до 200° С.

В основе последовательности загрузки шихты лежит следующий порядок. Если сплав готовится из чистых металлов, первым загружают основной компонент сплава. Первым в печь вводят шихтовый материал, масса которого составляет наибольшую долю в навеске. В жидкую ванну сначала загружают тугоплавкую шихту. В последнюю очередь вводят легкоплавкие и химически активные компоненты сплава. После этого сплав рафинируют и перед разливкой модифицируют.

7. ПЛАВКА И ЛИТЬЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

7.1. Особенности плавки алюминиевых сплавов

Алюминиевые сплавы чаще всего выплавляют в индукционных печах, а также в тигельных и отражательных печах, работающих на электроэнергии, 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 $800-300^{\circ}\text{C}$ (литейные сплавы) и до $750-760^{\circ}\text{C}$ (деформируемые сплавы) [11,12]. С целью защиты расплавов от окисления и насыщения водородом плавку ведут в вакууме или в атмосфере инертных газов [13, 14]. Однако эти способы неэкономичны и малопродуктивны [10], поэтому в производственных условиях чаще всего применяют покровные флюсы (табл. 48).

Таблица 48

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. 49.

Таблица 49

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 алюминиево-магниевого
3 4 5 6	60MgCl ₂ CaCl+40CaF ₂ 12...15CKCl+80MgCl ₂ KCl+ 5...8BaCl 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. 50.

Таблица 50

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) [7,9].

7.2. 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) [9-11].

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%-го раствора NaON 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 ши-

роким 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 1K016A или 1K025A. 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 двухслойными оболочками: первый слой из смеси с 6-10% терморезактивной 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, приме-

нением “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.

7.3. Производство алюминиевых 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. 21.

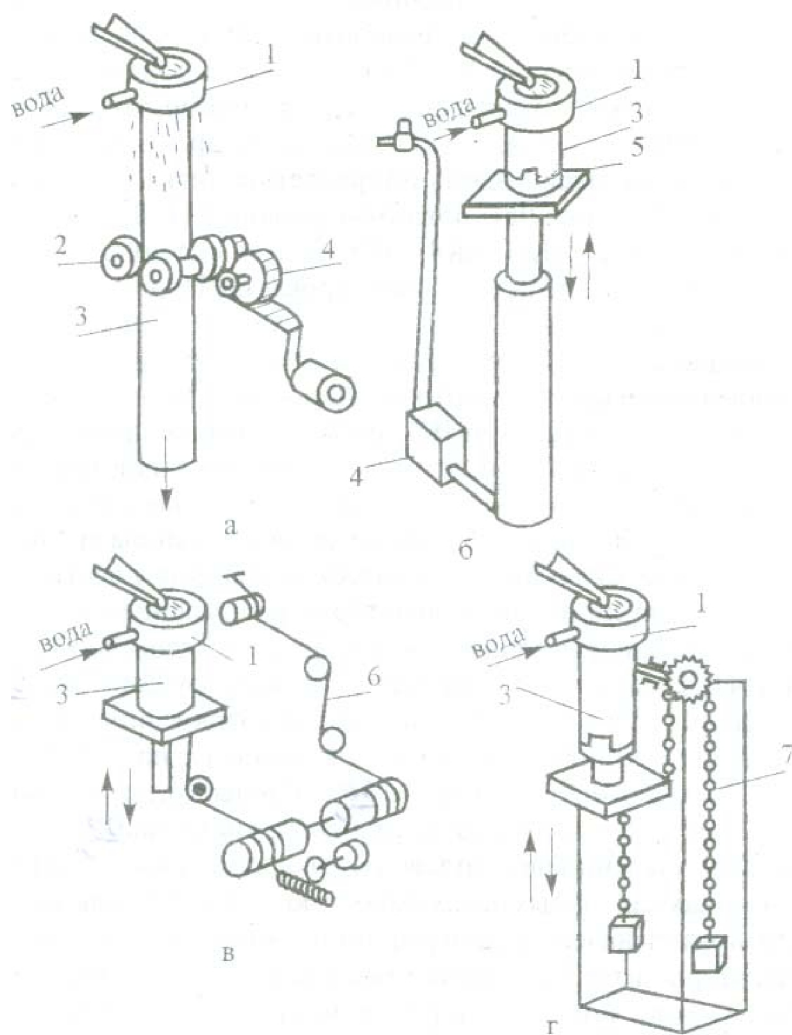


Рис. 21. Схемы машин полунепрерывного литья с валковым (а), гидравлическим (б), тросовым (в) и цепным (г) приводами: 1 – кристаллизатор, 2 – валки, 3 – слиток, 4 – привод, 5 – подвижной поддон, 6 – трос, 7 – цепь

На машинах полунепрерывного литья отливают сплошные (диаметр 55-1100 мм) и полые (наружный диаметр 150-840 мм, внутренний 50-600 мм) 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, АМгб, 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. 22. Кристаллизаторы скольжения бывают двух типов: корпусные и гильзовые. Как правило, гильзы изготавливают из дюралю, а корпуса – из сплава 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. 22, 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. 22, б). Полые отливки отливают в кристаллизаторах с водоохлаждаемым стержнем (рис. 22, 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, футерованную изнутри. Сифон имеет два колена. В верхней части он соединяется с вакуумным насосом. Перед началом перелива сифон нагревается, после чего создается разрежение.

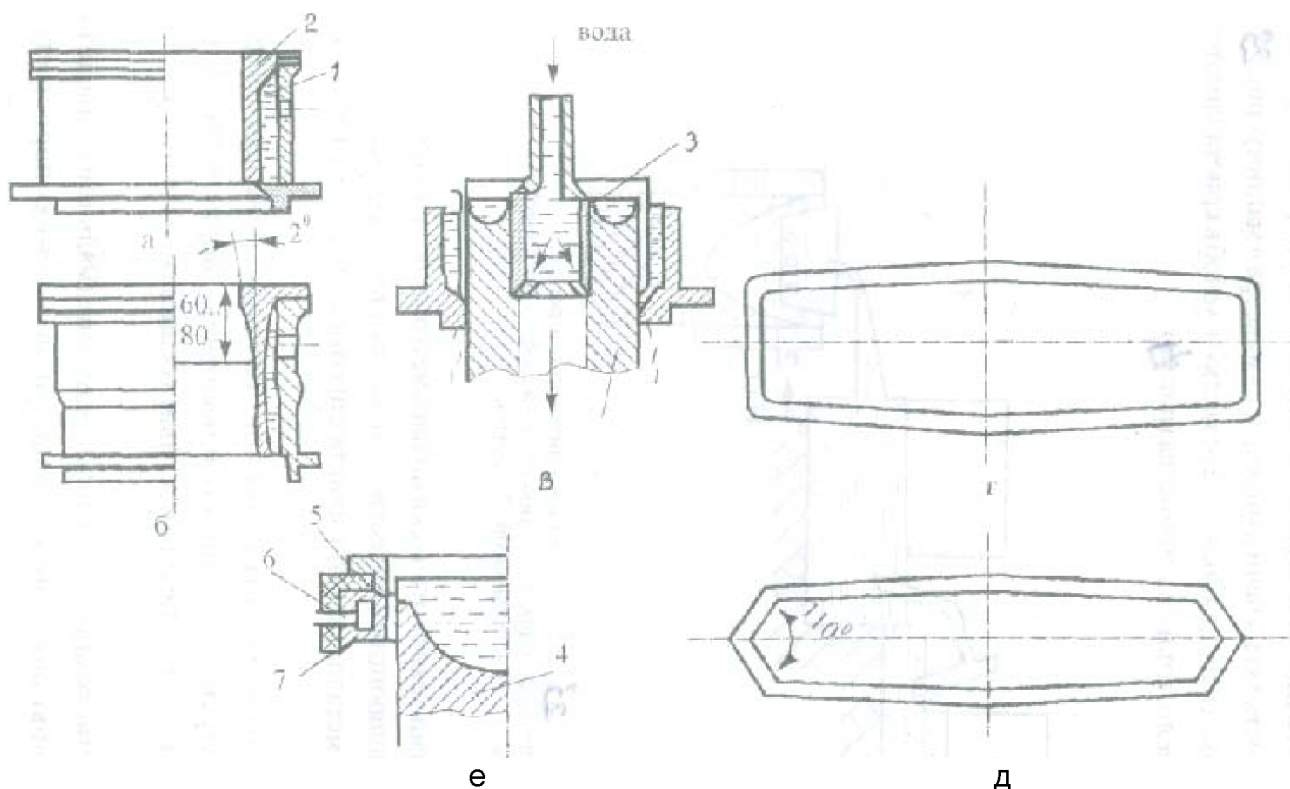


Рис. 22. Схемы кристаллизаторов: а, б – для отливок сплошных слитков; в – полых цилиндрических слитков; г, д – для отливки плоских слитков; е – электромагнитный кристаллизатор; 1 – корпус, 2 – гильза, 3 – водоохлаждаемый стержень, 4 – слиток; 5 – экран, 6 – корпус, 7 – индуктор

Печь, миксер и литейные машины расположены на разных уровнях для перелива металла из печи в миксер и из миксера в машину (рис. 23).

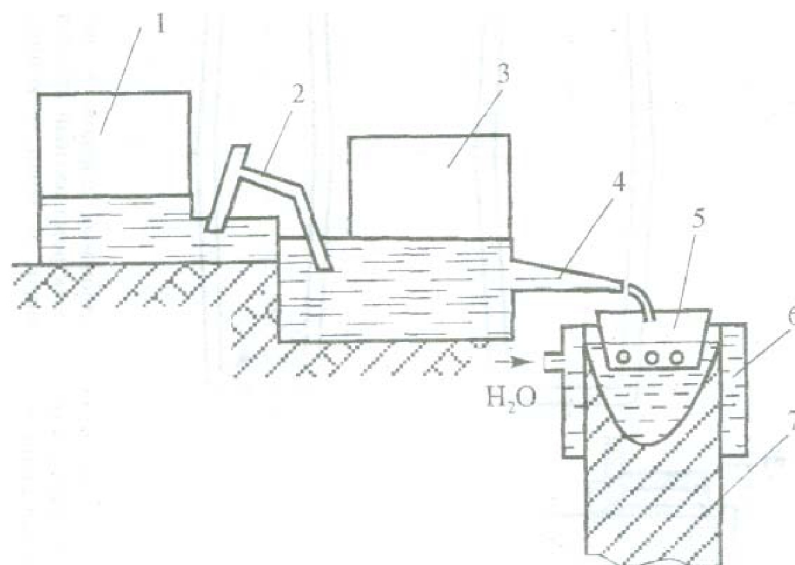


Рис. 23. Схема плавильно-литейного агрегата: 1 – плавильная печь, 2 – сифон, 3 – миксер, 4 – желоб, 5 – распределительная коробка, 6 – кристаллизатор, 7 – слиток

Расплав поступает из миксера через летку и желоб в кристаллизатор через распределительные устройства (рис. 24).

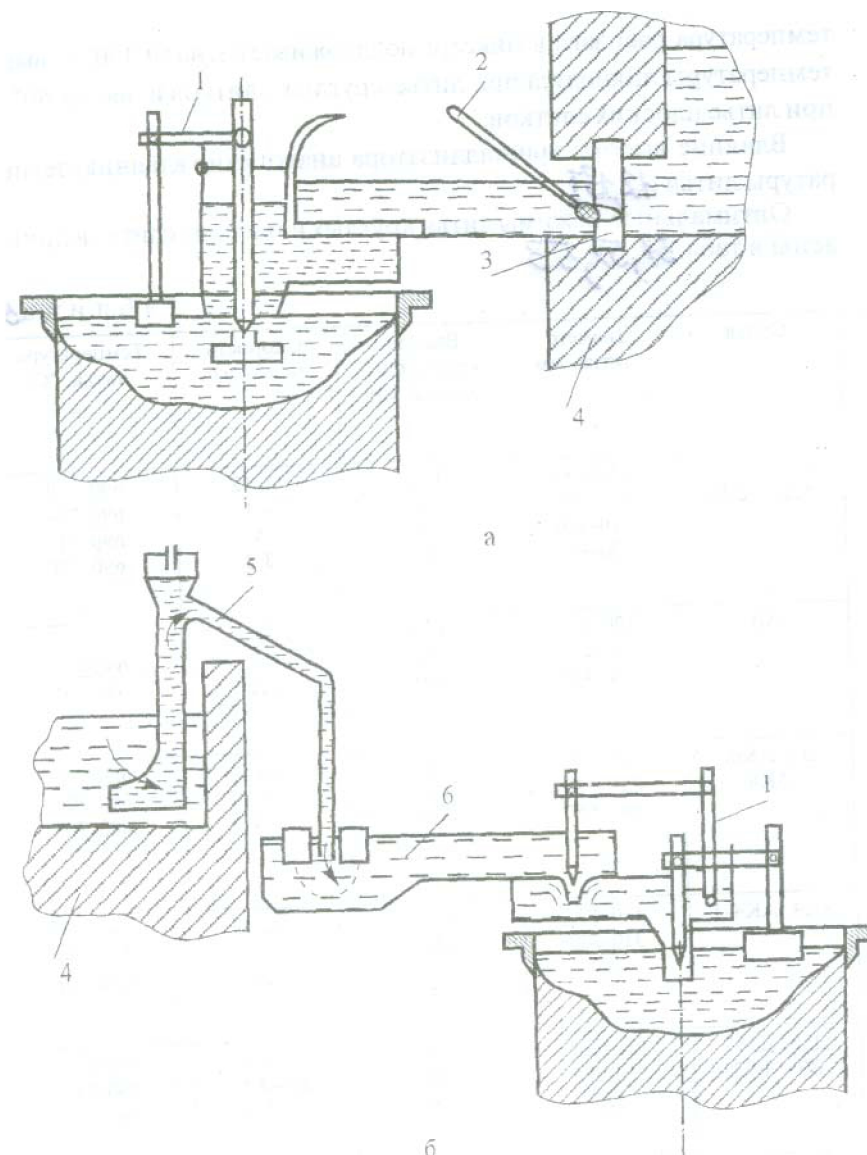


Рис. 24. Схема подачи расплава через летку с поплавковым регулятором (а) и сифоном с поплавковым регулятором подачи металла из миксера, поддержание постоянного уровня металла в коробке и кристаллизаторе (б): 1 – поплавковый регулятор; 2 – ломик с шнуровым асбестом; 3 – шамотная плита; 4 – миксер; 5 – 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 [12, 13].

Оптимальные режимы литья круглых и плоских слитков приведены в табл. 51, 52, 53.

Таблица 51

Сплав	Диаметр слитка, мм	Высота кристаллизатора, мм	Скорость литья, м/ч	Температура литья, °С
АД31, ЛД33, 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 52

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 53

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	70-90/35-40 75-85/35-40
АК6, АК8	700-730	80-90/25-30	20-30/38-45	
Д16	720-740		20-30/38-45	
АК4, АД1	690-720	120-140/25-30	50-60/38-45	

8. ПЛАВКА И ЛИТЬЕ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

8.1. 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, МЛ5п.ч., МЛ 6 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 большой 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 плавленый карналлит с добавками фтористого кальция. Составы некоторых флюсов приведены в табл. 54.

Таблица 54

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	$33...40\text{MgCl}_2 + 25...36\text{KCl} + <7\text{CaCl}_2 + 15...20\text{CaF}_2 + 7...10\text{MgO} + <3\text{H}_2\text{O}$	Для плавки в выемных 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 [6, 7, 8, 14].

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 расплава 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 – трудномодифицируемые (сплавы систем Mg-Mn и Mg-Al-Zn) и легкомодифицируемые (сплавы систем Mg-Zn и Mg-РЗМ и чистый магний). Для второй группы сплавов основным модификатором [10, 12] является цирконий (0,3-1,0%) [10, 12]. 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. 55.

Таблица 55

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.

8.2. 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 необходимо 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.

Магниевого 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 КО2; 0,2-0,3% ортофосфорной кислоты плотностью 1,29-1,30 г/см³; 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.56.

Таблица 56

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. Магниевого 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 питатель; 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 [15]. Режимы литья приведены в табл. 57.

Таблица 57

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

8.3. Производство слитков из магниевых сплавов

Деформируемые магниевые сплавы плавят под флюсом в отражательных или индукционных печах [8, 13, 14, 22]. 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 тростовые и цепные литейные машины со скоростью опускания стола 2-20 см/мин. Отливка производится в корпусные и гильзовые кристаллизаторы. Режимы литья приводятся в табл. 58.

Таблица 58

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

9. ПЛАВКА И ЛИТЬЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

9. 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% [6, 17].

Титан активно поглощает водород (до 400 см³/г). 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 [18] ведут в вакуумных дуговых графитовых гарниссажных печах с расходуемым электродом (рис. 25).

Плавку ведут следующим образом [8, 19]. 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.

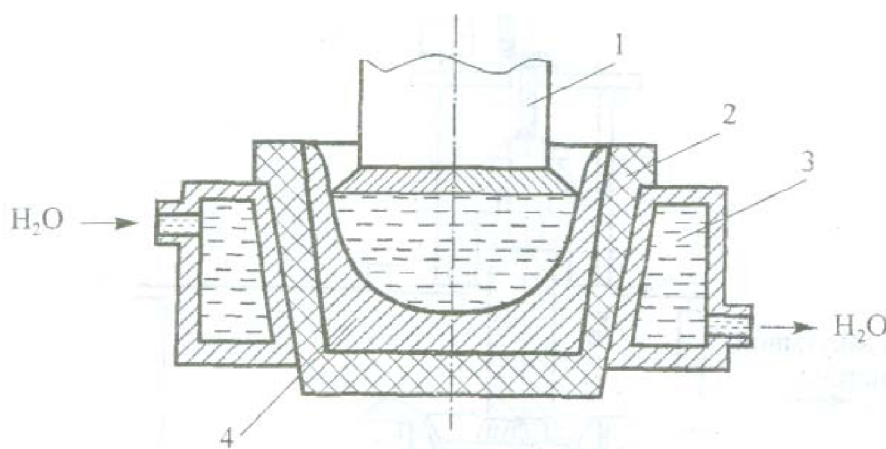


Рис. 25. Схема вакуумной дуговой гарниссажной плавки: 1 – расходный электрод, 2 – графитовый тигель, 3 – охлаждение, 4 – гарниссаж

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 [19].

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 [19].

В отечественной практике нашли применение плавильно-заливочные установки модели 833Д, ВДЛ-4, “Нева-2” ДВЛ-250, ДВЛ-160М, ДТВГ-0, 6ПЦ и др. Принципиальная схема гарниссажной печи показана на рис. 26.

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.

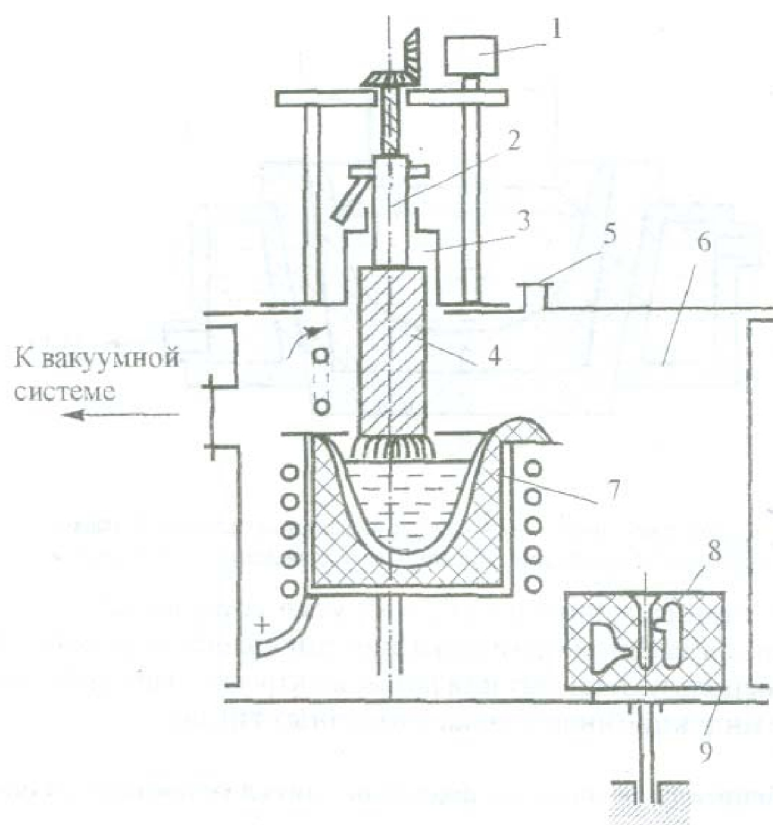


Рис. 26. Принципиальная схема гарниссажной печи: 1 – привод; 2 – электродержатель; 4 – расходный электрод; 5 – смотровой люк; 6 – камера; 7 – тигель; 8 – форма; 9 – центробежная установка

9.2. 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 керамических 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 ($1750-2000^{\circ}\text{C}$) и форм ($20-30^{\circ}\text{C}$) 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. 27.

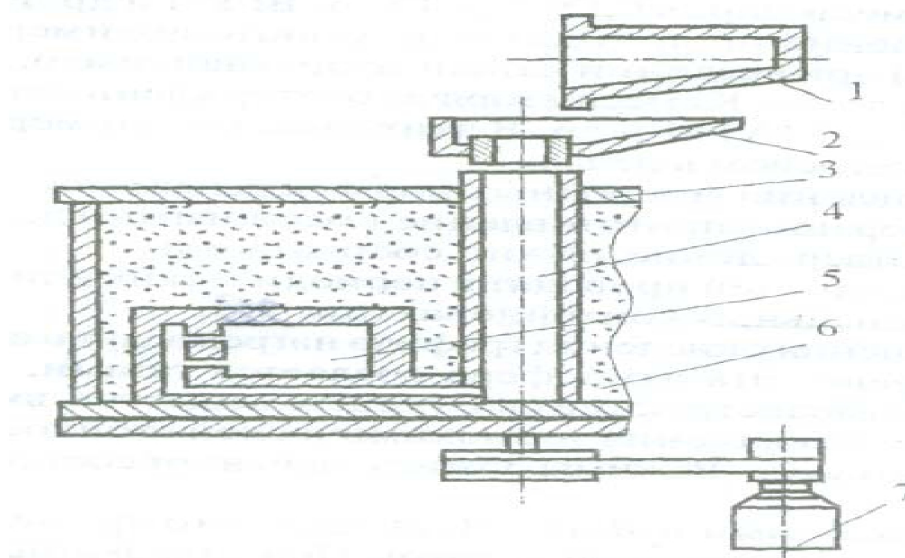


Рис. 27. Схема заливочного контейнера: 1 – тигель; 2 – приемно-направляющий лоток; 3 – контейнер; 4 – центральный стояк; 5 – форма; 6 – наполнитель; 7 – привод

Литье в уплотняемые формы. Уплотняемые литейные формы изготавливают в основном из углеродных формовочных смесей методами набивки, прессования или встряхивания. Углеродные смеси разделяются 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. 28).

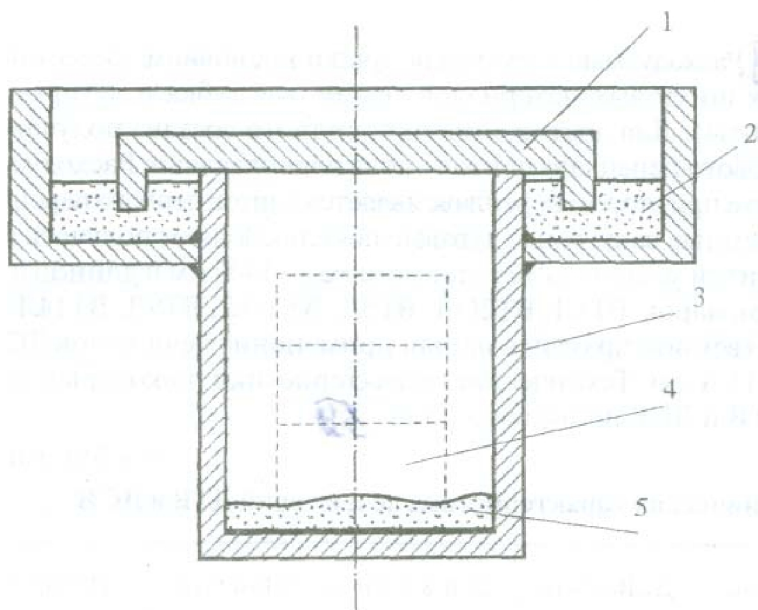


Рис.28. Контейнер для обжига графитовых форм: 1 – крышка; 2 – песчаный затвор; 3 – контейнер; 4 – формы; 5 – графитовая засыпка

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 [17].

Литье по выплавляемым моделям. Чаще всего его применяют для получения сложных тонкостенных отливок. При этом формы изготавливают 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), ВИАМ102 (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° С.

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° С. 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.

9.3. Производство титановых слитков

В настоящее время титановые слитки изготавливают главным образом в вакуумных дуговых печах с расходуемым электродом [7, 8, 20]. 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.59.

При переплаве слиток формируется в медном водоохлаждаемом (“ГЛУХОМ”) кристаллизаторе. Схема печи типа ДСВ показана на рис. 29.

Таблица 59

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
Наиб. 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

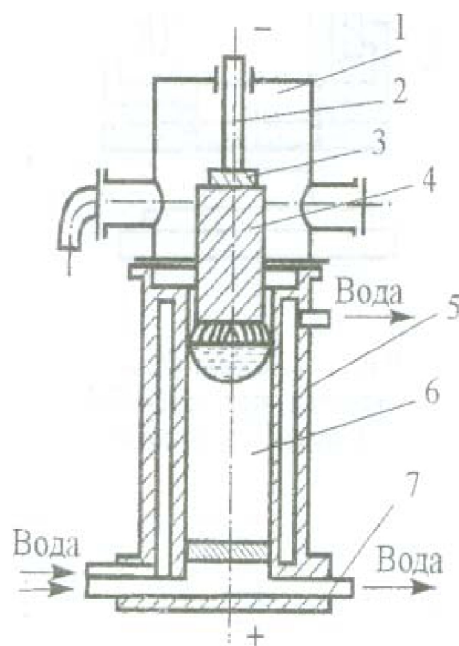


Рис. 29. Схема печи типа ДСВ: 1 – вакуумная камера; 2 – электрододержатель; 3 – огарок; 4 – расходуемый электрод; 5 – изложница (кристаллизатор); 6 – слиток; 7 – поддон

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.) и камере печи 1,33 Па (10^{-2} мм рт. ст.) [26].

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. 30).

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.

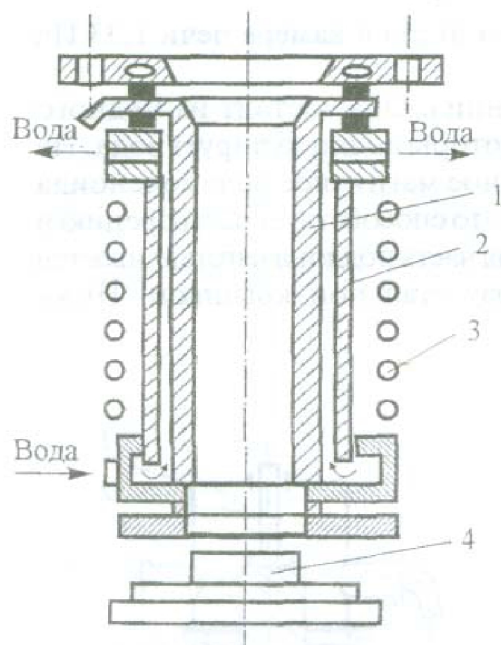


Рис. 30. Схема изложницы: 1 – кристаллизатор;
2 – корпус; 3 – соленоид; 4 – поддон

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. 31.

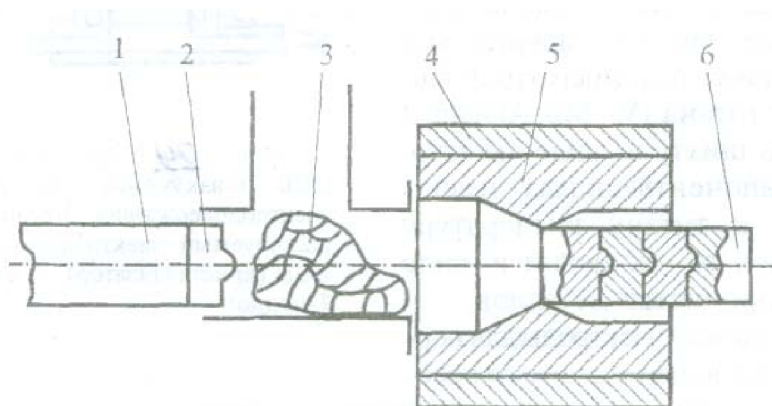


Рис. 31. Схема прессования расходуемого электрода через конусную матрицу:
1 – пресс-штемпель; 2 – пресс-шайба; 3 – шихта; 4 – контейнер; 5 – матрица;
6 – электрод

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 – расходуемый электрод" (ГРЭ). В этом случае отходы расплавляют в гарниссажной печи, расплав сливают в изложницу и получают слиток, который затем используется как расходуемый электрод.

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

10.1. Особенности плавки и литья никелевых сплавов и сталей

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 [21]. Характеристика вакуумных печей приведена в табл. 60.

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

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($3,2 \times 10^{-2} - 2,2 \times 10^{-4}$)	5,0-0,33($3,2 \times 10^{-2} - 2,2 \times 10^{-4}$)
Габариты форм, м (ширина x длина x высота)	0,5x0,6x1,0	0,7x1,6x1,0
Масса печи, т	10	30

10.2. Изготовление лопаток ГТД

В современном авиационном двигателе одними из важнейших деталей являются лопатки турбин. Эксплуатационные характеристики этих лопаток в значительной степени определяют параметры всего двигателя. Они работают в высокотемпературном газовом потоке в условиях больших нагрузок от центробежных и газовых сил, термических напряжений, подвергаются газовой коррозии и могут испытывать удары при попадании посторонних тел при эксплуатации изделий.

Разрушение лопаток ведет к поломке двигателя с опасными последствиями для самолета. Для изготовления лопаток были разработаны специальные сплавы на никелевой основе, которые обладают оптимальной комбинацией свойств, позволяющих лопаткам работать в этих сложных условиях.

К концу 50-х годов был практически полностью использован запас жаропрочности деформируемых сплавов на никелевой основе. Повышению жаропрочных и других свойств сплавов способствовало их легирование. При введении большого количества легирующих элементов в сплав наряду с повышением их жаропрочности ухудшается их пластичность. Поэтому наиболее жаропрочные литые сложнолегированные сплавы с гетерогенной структурой имеют высокую твердость, вязкость и трудно обрабатываются. При этом возникла потребность в изготовлении охлаждаемых лопаток с внутрен-

ней полостью. По этим причинам была внедрена технология литья лопаток по выплавляемым моделям.

Способ литья получил промышленное развитие лишь в 40-х годах нашего столетия. Он применяется для получения сложных по конфигурации тонкостенных (до 0,3 мм) отливок с размерами повышенной точности ($\pm 0,125$ мм на длине 25 мм) и высоким классом чистоты, требующих сложной и трудоемкой механической обработки, а также получения изделий из труднообрабатываемых сплавов. Такие детали обычно применяют в конструкциях и механизмах без предварительной механической обработки за исключением сопрягаемых поверхностей. Этот способ применяют, например, для получения турбинных лопаток авиационно-ракетных двигателей. Особенности этого способа литья: одноразовое использование моделей и керамической формы, отсутствие в форме разъемов.

Это исключает образование перекосов и заливов. При этом стоимость отливок, полученных этим способом, значительно выше, чем при литье в другие формы. В промышленности применяют следующие разновидности способов получения точных отливок:

а) по выплавляемым моделям, когда выплавляют модель из легкоплавких компонентов (парафин, стеарин, канифоль, церезин и др.);

б) по выжигаемым моделям, когда модель из пенополистирола выжигается заливным металлом;

в) по растворяемым моделям, когда разовая модель растворяется специальными составами.

Метод литья по выплавляемым моделям включает в себя следующие циклы:

- приготовление модельной массы;
- изготовление керамической оболочки;
- выплавка моделей из форм;
- изготовление моделей и модельных блоков;
- прокалка оболочек;
- заливка формы жидким металлом;
- выбивка отливки из формы, обработка отливок.

На заводах авиационной промышленности применяют метод литья по выплавляемым моделям с направленной кристаллизацией. При направленной кристаллизации в отливке образуется 2-4 кристалла, направленных вдоль лопатки.

Столбчатая структура позволяет повысить жаропрочность, пластичность, термостойкость и выносливость лопаток по сравнению с равноосной структурой. Методом литья по выплавляемым моделям можно получить лопатки со сложной внутренней полостью, с тонкими стенками. Высокая точность отливок и чистота их поверхности позволяют свести к минимуму механическую обработку (шлифовка пера и обработка замка).

В настоящее время нашли применение сплавы для отливки лопаток, химический состав и некоторые свойства которых приведены в табл. 61.

Таблица 61

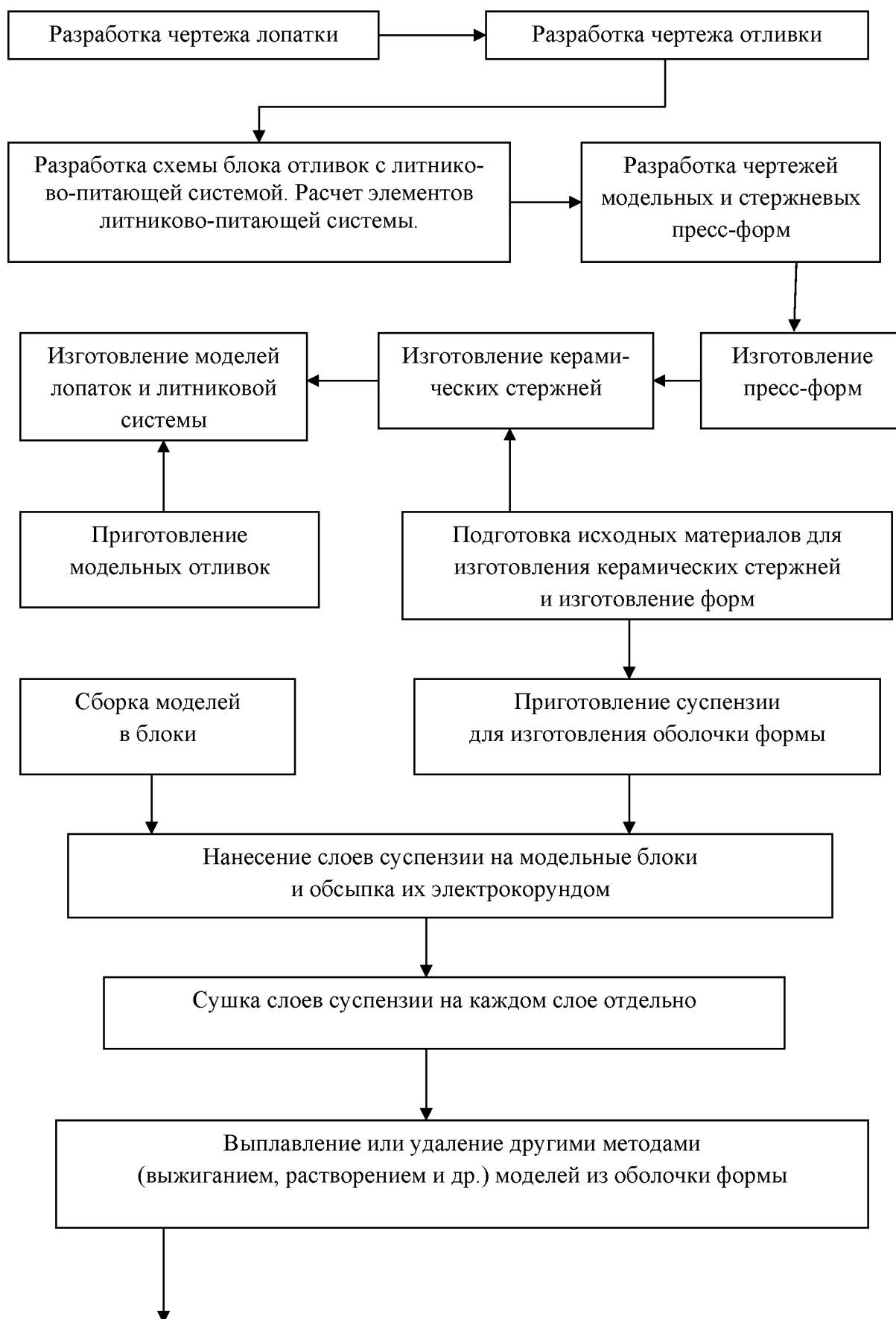
Химический состав и некоторые свойства сплавов для литья лопаток

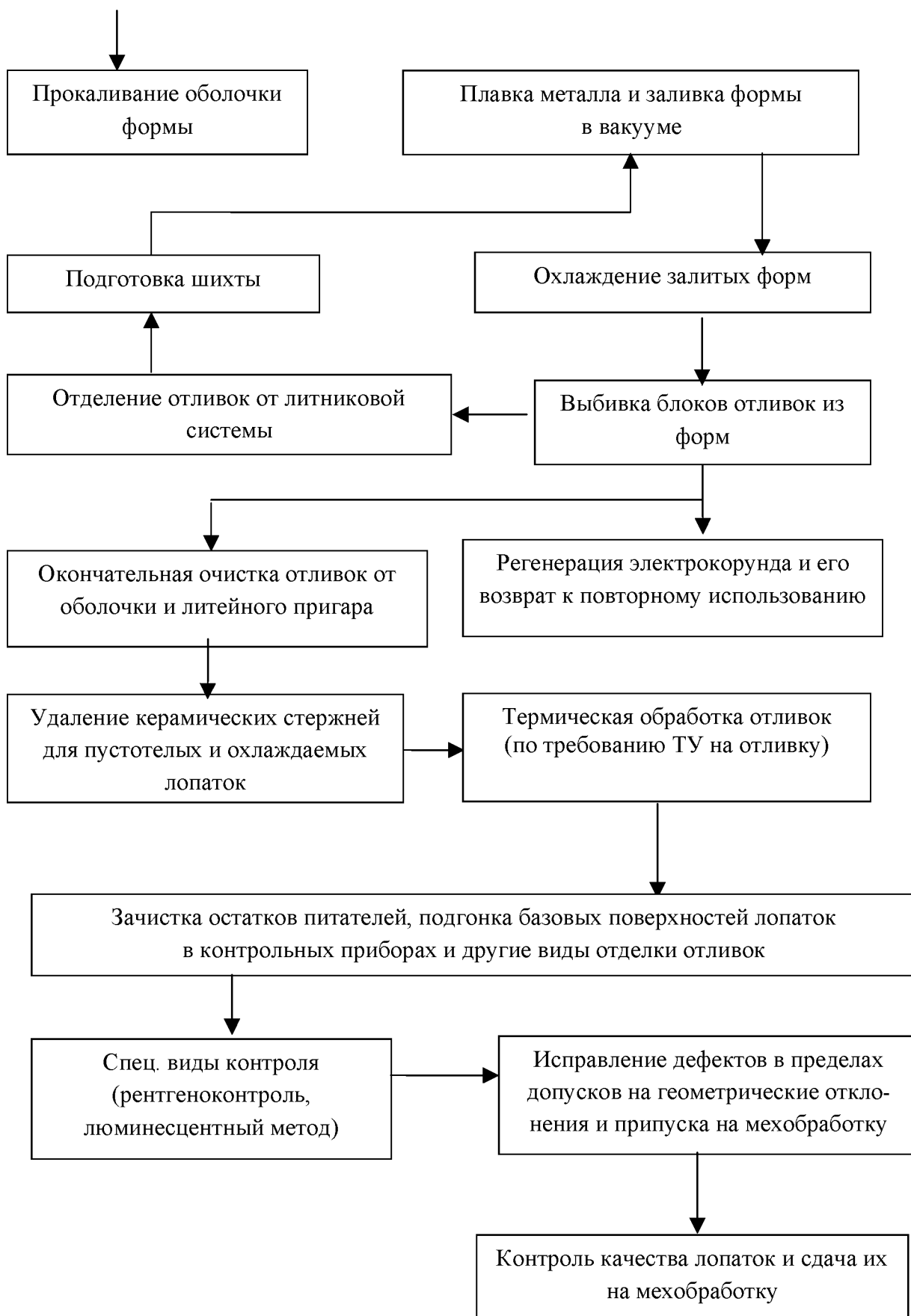
Марка сплава	Содержание элементов, % по массе												Другие эл-ты	σ_B , кг/мм ²	δ , %	ψ , %
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	Al	Ti	Co	Fe	V				
ЖС6кВИ	0,13-0,2	≤0,4	≤0,4	9,5÷12,0	Осн.	3,5÷4,8	4,5÷5,5	5,0÷6,0	2,5÷3,2	4,0÷5,5	≤2,0		S<0,015 P<0,015	75	5	-
ЖС6уВИ	0,13-0,2	≤0,4	≤0,4	8,0÷9,5	Осн.	1,2÷2,4	9,5÷11,0	5,1÷6,0	2,0÷2,9	9,0÷10,5	≤1,0			85	3	4
ЖС6фВИ	0,12-0,19	≤0,4	≤0,4	4,0÷7,0	Осн.	0,8÷1,5	11,0÷13,0	9,5÷12,0	0,8÷1,5	6,0÷10,5	≤1,0	0,8÷1,2		85	3	-
ЖС-30	0,11-0,2	≤0,4	≤0,4	5,0÷9,0	Осн.	0,4÷1,0	11,0÷12,6	4,8÷5,8	1,4÷2,8	7,5÷9,5	≤1,0			85	3	-
ВЖЛ-12Э	0,12-0,2	≤0,4	≤0,4	8,5÷10,0	Осн.	2,7÷3,4	1,0÷1,8	5,0÷5,7	4,2÷4,7	8,0÷10,5	≤2,0	0,5÷1,0	S≤0,015 P<0,015	85	5	7

Литые рабочие лопатки и лопатки соплового аппарата, применяемые в двигателе ГТД, разделяются на неохлаждаемые и охлаждаемые. Неохлаждаемые лопатки бывают цельные без внутренней полости или пустотелые.

Охлаждаемые лопатки все пустотелые, имеющие внутренние полости с находящимися в них различными элементами, повышающими эффективность охлаждения пера лопатки в процессе работы двигателя путем продувки их охлаждаемым воздухом. Охлаждаемые лопатки подразделяются на лопатки, в которых воздух внутри распределяется при помощи дефлектора (дефлекторные лопатки), а также без него. Распределение воздуха и отбор тепла от стенок пера лопатки в последних производится при помощи элементов внутренней полости, которые формируются в процессе отливок лопаток. Ниже приведена технологическая схема процесса литья лопаток [22].

Схема процесса изготовления отливок лопаток по выплавляемым моделям





Для изготовления выплавляемых моделей лопаток применяются пресс-формы. Они должны отвечать следующим основным требованиям:

- обеспечить получение моделей с заданной точностью и чистотой поверхности;
- иметь минимальное число разъемов;
- иметь устройства для удаления воздуха из рабочих полостей;
- быть технологичными в изготовлении, долговечными и удобными в работе.

Как правило, пресс-формы на модели лопаток и керамические стержни изготавливают из стальных сплавов типа 38Х, а на литниковые системы из алюминиевых слитков типа Д16.

В последнее время нашло широкое применение проектирование чертежей пресс-форм на керамические стержни и модели лопаток на персональных компьютерах с использованием программного обеспечения типа “Симатрон-90”, которое позволяет производить изготовление технически сложных пресс-форм на станках с ЧПУ.

Для формирования внутренней полости пустотелых лопаток используются керамические стержни.

Стержни подразделяются на спеченные (I класс) и холодноотвержденные (II класс).

Спеченные стержни получают сухим твердофазным спеканием. Под спеканием понимают изготовление камнеподобных предметов после обжига сформированных с пластификатором смесей из полидисперсных порошков. Сухое спекание – это процесс, идущий в направлении уменьшения свободной энергии системы и протекающий при температуре не менее 0,8 Т плавления чистого огнеупорного окисла, при этом зерна порошков “свариваются” (спекаются друг с другом), стержни приобретают прочность.

Способ изготовления холодноотвержденных стержней основан на свойстве кислого ($\text{pH}=2$) связующего раствора этилсиликата (ЭТС) переходить в желатинообразное, а затем в твердое состояние – гель – при введении в смесь щелочной жидкости с $\text{pH}=8$. Гель цементирует зерна основы, обеспечивает прочность стержню. В производстве данный способ изготовления стержней называется “ШОУ-процесс”.

Изготовленный керамический стержень устанавливается в модельную пресс-форму базовыми поверхностями, на которые в последующем наносятся огнеупорные суспензии оболочковой формы. По

этим базовым поверхностям происходит фиксация керамического стержня в объеме рабочей полости модельной пресс-формы и в оболочковой форме после удаления модельной массы, прокалки формы и закалки ее жидким жаропрочным сплавом. Технология изготовления керамического стержня выбирается исходя из требований, предъявляемых к геометрической точности толщин стенок, из сложности конструкции внутренней полости и технологического процесса литья лопатки. В последнее время широкое применение нашел способ изготовления керамических стержней методом твердофазного спекания.

Процесс изготовления моделей включает операции приготовления модельных составов, получения моделей отливок лопаток и литниково-питающих систем, отделки и контроля моделей, сборки их в блоки и контроля последних.

К свойствам модельных составов предъявляют комплекс требований, которые могут иметь существенное различие в зависимости от конфигурации размеров и назначения отливок, необходимой размерной точности их и качества поверхности. Необходимо, чтобы модельные составы обеспечивали получение высококачественных моделей при одновременной технологичности составов (простоте их приготовления, удобстве использования, возможности утилизации).

В отечественной практике литья по выплавляемым моделям наиболее часто используют парафин, церезин, буроугольный воск, торфяной воск, канифоль, карбамид, стеарин, полиэтилен и другие добавки, на основе которых приготавливают модельные составы. Предварительное приготовление большинства модельных составов состоит в поочередном или одновременном расплавлении составляющих, фильтрации расплавов и разливке их непосредственно по калеманам (нагревательное устройство для поддержания температуры модельного состава) на рабочие места или в формы - изложницы. При подготовке выплавляемых модельных составов могут использоваться до 90% возврата, собранного при удалении моделей из оболочек форм.

Для изготовления моделей лопаток в качестве модельного состава применяется карбамид с добавками калиевой селитры (МОН-10К). Модели, изготовленные из состава на основе карбамида, подвержены влиянию влажности, т.е. гигроскопичны, поэтому они покрываются раствором лака АК-593.

Сборка моделей лопаток в блоки, как правило, производится двумя способами:

- припаиванием моделей лопаток к модели литниковой системы с помощью подогретого ножа, шпателя или специального электропаяльника;

- соединение моделей в кондукторе с одновременной отливкой моделей литниковой системы.

Основа способа литья по выплавляемым моделям – оболочковая форма: неразъемная, горячая, негасотворная, газопроницаемая, жесткая, с гладкой контактной поверхностью, точная. Для изготовления отливки лопаток применяется многослойная оболочка, получаемая нанесением суспензии на модельный блок с последующей обсыпкой и сушкой. Суспензия для оболочковых форм – это взвесь твердых различной величины частиц микропорошков огнеупорной основы (белый электрокорунд, дистенсилиманит) в жидкости (связующем).

В качестве связующего в суспензии применяется гидролизированный этилсиликат-40. Как правило, применяют в зависимости от габаритов модельного блока и технологии заливки формы 7-10 слоев огнеупорного покрытия. Первый облицовочный слой обсыпают мелкозернистым (0,1-0,16 мм) материалом, чтобы получить гладкую контактную поверхность.

После формирования оболочковой формы производится удаление модельного состава (массы). Как правило, восковые составы выплавляются, солевые – растворяются в воде, пенополистироловые – выжигаются.

В дальнейшем оболочковые формы подвергаются прокаливанию. При прокаливании решаются три задачи: удаление газотворных составляющих, повышение прочности, нагрев оболочки для лучшего заполнения полостей металлическим расплавом. Прокаливают оболочки в окислительной среде нагревом в газовых или электрических печах до 900-1000° С.

При изготовлении литых лопаток турбин применяют вакуумноплавильные установки, в которых производится подогрев керамической оболочки до технологических температур, плавка металла, заливка оболочек и кристаллизация залитых оболочек.

Плавка металла в вакуумных установках производится в индукционных печах и печах сопротивления, в которых тепловая энергия передается оболочке и металлу излучением от нагревателей.

Макроструктура лопаток в зависимости от технологического процесса отливки разделяется на три типа:

- поликристаллическая (равноосная) структура;
- направленная (продольно-ориентировочная) структура;
- монокристаллическая структура.

Лопатки с равноосной структурой отливаются в вакуумных печах непериодического или полунепрерывного действия (УППФ-3).

До середины семидесятых годов свойства литейных сплавов улучшались за счет добавок дополнительных легирующих элементов, но постепенно был достигнут такой уровень, при котором дальнейшее легирование практически не улучшило характеристик никелевых сплавов.

Дальнейшее улучшение свойств сплавов было получено за счет нового подхода к технологии производства лопаток. Таким подходом явилось получение направленных структур, при котором металл подвергается процессу кристаллизации таким образом, что направление в материале с оптимальным сочетанием механических свойств устанавливается параллельно оси основного напряжения в металле. Повышение прочности, как результат ориентации макроструктуры, достигается путем исключения наиболее слабых мест структуры (поперечных границ кристаллов) или благодаря наличию ориентированной высокопрочной фазы в микроструктуре, как, например, в эвтектических сплавах или сплавах, упрочненных тугоплавкими волокнами.

Отливку лопаток с направленно-кристаллической структурой производят в проходных методических вакуумных печах непрерывного действия ПМП-2, ПМП-4. В них керамическая оболочка с навеской металла в чаше (т.е. бестигельная плавка) устанавливается в графитовую опоку, и эти опоки одна за другой проходят через зоны нагрева и кристаллизации печи.

В зоне нагрева оболочковая форма и металл разогреваются до требуемой температуры, металл в чаше плавится и сливается в форму. В зоне кристаллизации залитые формы в графитовых опоках проходят по водоохлаждаемому кристаллизатору, происходит направленное охлаждение формы с заданной скоростью за счет выхода из зоны нагрева путем продвижения вдоль постепенно поднимающихся боковых нагревателей и теплопередачи от формы к кристаллизатору и стенкам печи.

В процессе прохождения графитовых опок с залитыми оболочками по зоне кристаллизации в отливке формируется направленная структура.

На основе технологического процесса отливки лопаток с направленной кристаллизацией в серийном производстве разработана технология литья лопаток с монокристаллической структурой.

Формирование монокристаллической структуры производится затравочным способом, позволяющим получить отливки любой заданной ориентации.

Для этого перед заливкой в данной части керамической оболочки устанавливают монокристаллическую тугоплавкую затравку с заранее заданной кристаллографической ориентацией. В процессе заполнения оболочки в зонах плавления металлом происходит подрастворение торца тугоплавкой затравки жидким сплавом, а при охлаждении оболочки в зону кристаллизации происходит передача структуры затравки кристаллизующей отливке.

Монокристалльные турбинные лопатки обычно имеют кристаллографическую ориентацию 001 относительно их вертикальной оси. Применение технологии монокристалльного литья для жаропрочных сплавов с традиционным легированием, содержащих в своем составе элементы, упрочняющие границы зерен, не позволяет в полной мере реализовать потенциальные возможности монокристаллов. Поэтому специально разработаны безуглеродистые сплавы для монокристалльного литья. По сравнению со сплавами с направленной структурой, монокристалльные сплавы имеют значительное преимущество по характеристикам выносливости. Это связано с отсутствием карбидной фазы, которая является очагом зарождения микротрещин при циклических и термоциклических нагрузках.

После охлаждения залитых оболочковых форм на воздухе до температур окружающей среды производится выбивка блока отливок из керамической оболочки. Бой керамической оболочки после выбивки подвергается размолу и последующей регенерации.

Отделение литниковой системы от залитых лопаток производится на специализированных станках при помощи абразивно-отрезных кругов на вулканитной основе или армированными отрезными кругами.

Отлитые лопатки с керамическим стержнем внутри подвергаются операции “Удаление керамического стержня”. Данная операция производится или путем механического разрушения керамического

стержня при помощи клепального пневмомолотка, или химическим способом в расплаве соли бифторида калия.

Лопатки, отлитые с направленно-кристаллизованной структурой или с монокристаллической структурой, с целью контроля состояния качества структуры подвергаются травлению поверхности в растворах хлорного железа. В результате на поверхности отливки проявляется макроструктура.

Отлитые лопатки в дальнейшем подвергаются очистке сухим способом песчано-воздушной струей в специальных очистных камерах. В качестве абразивного материала применяется белый электрокорунд.

В дальнейшем отлитая лопатка подвергается механической зачистке заусенцев, облоев и др. неровностей на поверхности, подгонке базовых поверхностей для обеспечения дальнейшей механической обработки заготовок.

100% изготовленных отливок лопаток подвергаются рентгеноконтролю на наличие внутренних дефектов и люминесцентному методу контроля на выявление поверхностных микродефектов типа плен, микротрещин, рыхлот.

Годные отливки лопаток по геометрическим и металлургическим параметрам отправляются на дальнейшую механическую обработку для формирования замка и стыковых поверхностей, обеспечивающих их последующую сборку в колесо турбины.

10.3. Изготовление литого деформирующего инструмента

Промышленность характеризуется частой сменой вида изготавливаемых изделий и высокими требованиями, предъявляемыми к качеству заготовок. Это обуславливает необходимость разработок новых методов изготовления дешевой высокостойкой оснастки для кузнечно-прессового производства.

Изготовление штампов методом литья позволяет существенно уменьшить трудоемкость при механической обработке и снизить стоимость литого инструмента. Однако изготовление штампового инструмента крупных размеров, имеющих вес выше 300 кг, связано с рядом трудностей (структурная неоднородность и, как следствие, невысокий уровень характеристик вязкости и пластичности). Поэтому при производстве крупногабаритных литых штампов важным представляется применение способов, направленных на измельчение размеров и форм кристаллизующихся фаз (модифицирование раз-

личными способами: микролегирование, суспензионная разливка и др.).

Технологический процесс производства литого инструмента из сталей 45ХНМФЛ, 2Х5М2ФЛ и сплавов на основе никеля Х20Н77ТЮР, ЖС6, ЖС6У, ЖС6К и других марок сталей и сплавов включает следующие основные операции: изготовление литейной оснастки; изготовление форм; выплавка, заливка и охлаждение отливок; выбивка, обрубка, зачистка и очистка отливок; термическая обработка и контроль отливок [23, 24].

Изготовление литейной оснастки. При проектировании литейной оснастки необходимо учитывать линейную осадку в зависимости от марки сплава, габаритов и конфигурации литых заготовок инструмента, величина которой должна быть в пределах 1,0-2,5%. Припуски на механическую обработку, предусматриваемые в моделях, соответствуют техническим условиям и согласованным с заказчиком чертежам заготовки. Материал для изготовления модельной оснастки – дерево, алюминий или эпоксидная смола. Оснастка для изготовления литейных форм включает модельные комплекты верхней и нижней полуформ.

В нижней полуформе происходит оформление отливки с гравюрой штампа, клещевиной и т.д. и располагается литниковая система.

Модельная оснастка для нижней полуформы состоит из подмодельной плиты, на которой крепится модель. В верхней полуформе размещена прибыльная часть и часть литниковой системы. Оснастка для изготовления верхней полуформы должна быть закреплена на подмодельной плите.

С целью точного фиксирования полуформы при сборке на плитах предусмотрены центрирующие втулки для установки штырей.

Часть отливки, образующая гравюру штампов, выполняется керамическими стержнями – вставками, полученными по технологии выплавляемых моделей. Качество поверхности (шероховатость) и геометрические размеры модели должны соответствовать требованиям выплавляемых чертежей на литые заготовки.

Изготовление литейных форм. В зависимости от вида кузнечно-прессового инструмента и технических требований к нему нужно выбрать один из следующих вариантов комбинированных песчаных литейных форм:

с керамическими стержнями, оформляющими гравюру инструмента;

с оформлением гравюры чугуном кокилем с керамической облицовкой;

с оформлением гравюры керамическим стержнем-вставкой, полученным по методу выплавляемых моделей.

Инструмент в комбинированных песчаных формах с керамическими стержнями, оформляющими гравюру, изготавливают следующим образом:

наружные (нерабочие) поверхности инструмента выполняют в песчаных формах, при этом преимущественно применяют жидкостекольные облицовочные смеси;

облицовочную смесь наносят на модель из расчета получения в уплотненном состоянии слоя толщиной 20-30 мм – для мелких форм, 30-40 мм – для крупных форм;

формы получают на формовочных машинах или в парных опоках с использованием пневмотрамбовки;

по знаковым частям нижней формы устанавливают керамический стержень, правильность расположения которого контролируется шаблоном;

центровку верхней опоки относительно нижней при сборке формы производят по направляющим штырям.

Инструмент в комбинированных песчаных формах с выполнением гравюры чугуном кокилем с керамической облицовкой изготавливают таким образом: на плиту с моделью гравюры устанавливают кокиль и через специальные отверстия свободной заливкой заполняют керамической массой. Зазор между кокилем и моделью должен соответствовать толщине требуемого слоя облицовки и быть равным 4-10 мм.

Изготовление инструмента в формах с оформлением гравюры керамическим стержнем-вставкой, полученным по методу выплавляемых моделей, производится следующим образом. На поверхность гравюры штампа постоянной модели пульверизатором наносят тонкий слой легкоплавкой разделительной смеси, после чего на эту поверхность наносят 9-10 слоев огнеупорной суспензии, приготовленной на основе пылевидного кварца с последующей обсыпкой зернистым электрокорундом. После получения необходимой толщины корки модель (с коркой) погружается в кипящую воду, где корка снимается с модели.

Стержень-корку прокаливают при 850-1100°С с выдержкой в зависимости от габаритов корки в течение 1,0-4,0 ч. Преимущественно используют щелевые питатели и прибыли с экзотермическим обогревом.

Выплавка сталей и сплавов. Для получения инструмента развесом до 400 кг стали и сплавы выплавляют в индукционных печах с основной футеровкой. Для крупных литых заготовок из стали развесом более 400 кг плавку осуществляют в дуговых электропечах с кислой футеровкой окислительным процессом, а из сплава на никелевой основе – в дуговых печах с основной футеровкой.

Каждая партия шихтовых материалов должна иметь сертификат с указанием вида и марки шихтового материала, номера партии, веса и количества мест. Запрещается использование шихтовых материалов без сертификата, удостоверяющего их качество.

Отливка заготовок. Металл из печей сливают в очищенный стопорный ковш, нагретый до 700-800° С. Температура металла перед выпуском из печи контролируется термопарой погружения и должна соответствовать температуре, указанной в литейном чертеже для каждого сплава заготовки. Металл заливается в формы ровной короткой (не более 150 мм от днища ковша до литниковой чаши) струей. При заливке не допускается прерывания струи металла.

Охлаждение и очистка литых заготовок. Время охлаждения литых заготовок в формах в зависимости от сплава и развеса устанавливают по литейной технологии. После охлаждения отливки выбивают из форм и очищают от формовочной смеси, стержней, каркасов.

Отрезка литников и прибылей. Литниково-питающие системы стальных заготовок и заготовок, изготовленных из никелевых жаропрочных сплавов, удаляют анодно-механической резкой, огневой резкой или абразивными кругами. Огневую резку стальных отливок осуществляют после проведения обжига, нормализации или высокотемпературного отпуска.

Термическая обработка литых заготовок. Заготовки из сплавов ЖС6, ЖС6К, ЖС6У, Х20Н77ТЮР термически не обрабатываются. Заготовки из сталей 45ХНМФЛ, 2Х5М2ФЛ подвергаются предварительной термической обработке, которая в зависимости от веса и сложности конфигурации сводится к нормализации, отжигу или высокому отпуску. Окончательная термическая обработка и контроль свойств производятся, как правило, на предприятии-потребителе.

11. ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОТЛИВОК

В данной главе рассмотрены элементы конструирования отливок при литье в разовые песчаные формы [25-26].

Все табличные данные, необходимые при конструировании, приведены в [24]. При разработке технологии литья важным представляется изготовление литейных форм. Конструирование литейной формы включает следующие типовые вопросы: 1) анализ чертежа отливки; 2) разработку чертежа элементов литейной формы.

Чертеж литой детали

Чертеж детали представляет собой изображение отдельного элемента (части) машины, механизма в том виде, в каком элемент (часть) работает в составе машины или механизма.

Чертеж детали, первоначально выполненный инженером-конструктором, поступает для конструирования отливки инженеру-технологу. На чертеже детали приводится ее архитектурная форма, устройство, размеры, точность изготовления (шероховатость) в соответствии с действующими стандартами. При выполнении домашней работы нет необходимости оценивать степень точности размеров литой детали, поэтому на чертеже детали допуски не проставляются.

Поверхности литой детали, подвергаемые механической обработке, должны быть выполнены с припусками.

Припуск – это предусмотренный технологией получения заготовки дополнительный слой металла, достаточный для того, чтобы при его удалении можно было обеспечить заданные чертежом детали точность размеров и шероховатость. Припуски определяются расчетом или по справочным таблицам.

Отливка может отличаться от детали не только размером из-за наличия припусков, но и по форме отдельных элементов, которые невозможно или нерационально полностью воспроизводить в литье (из-за сложной конфигурации, малых размеров и т.п.). Дополнительный металл, необходимый для упрощенных очертаний отливки, называется **напуском**.

Разработка чертежа элементов литейной формы.

Определение положения отливки в форме

При выборе положения отливки в форме необходимо учитывать следующее:

– для улучшения условий формовки, уменьшения высоты модели, облегчения извлечения модели из формы отливку следует располагать “плашмя”, т.е. так, чтобы полость формы имела минимальный размер по высоте;

– ответственные части отливки располагать “вниз” или “сбоку”, т.к. в верхних частях отливки скапливаются литейные дефекты.

Выбор размера формы

Выбор размеров формы основан на следующих рекомендациях:

– количество разъемов должно быть минимальным. Предпочтительно выполнять форму с одним горизонтальным разъемом;

– большую часть отливки или всю отливку лучше размещать в нижней полуформе;

– необходимо проверить возможность беспрепятственного извлечения модели из формы;

– должно быть минимальное количество стержней.

Положение отливки в форме и расположение разъема необходимо изображать на чертеже следующим образом: плоскость разъема показывают штрихпунктирной линией с отрезками жирной контурной линии по концам, ограничивают их знаками Х и обозначают буквами РФ и РМФ (“разъем формы” или “разъем модели и формы”). Стрелки показывают положение верха (В) и низа (Н) формы в положении заливки.

Назначение припусков на механическую обработку

Перед нанесением припусков необходимо установить, все ли указанные на чертеже детали элементы, подвергаемые мехобработке, можно воспроизвести в отливке. В первую очередь это относится к отверстиям, пазам, углублениям. Под “толщиной” надо понимать толщину той части отливки, в которой должно быть отверстие. Отверстия меньшего диаметра не отливаются и на чертеже они должны быть зачеркнуты или заштрихованы в разрезах или сечениях красным карандашом.

Под “габаритным размером” надо понимать наибольший размер, указанный на чертеже детали, под “номинальным” – размер, связывающий на чертеже поверхность, на которую надо назначить припуск, с другими поверхностями. Найденные значения припусков надо указать на чертеже там, где проставлены знаки шероховатости

обрабатываемых поверхностей. Число, обозначающее припуск, записывают рядом со знаком шероховатости.

На чертеже показывают припуски на расстоянии 2-4 мм от контура обработанной поверхности независимо от фактической величины припуска. Обозначение припуска (число и выноска) выполняется красным карандашом.

Назначение формовочных уклонов

Поверхности модели (отливки), расположенные перпендикулярно к плоскости разъема, должны быть выполнены с уклоном. Величину уклона назначают в зависимости от способа формовки, высоты и материала модели по справочным таблицам.

На чертеже отливки необходимо указать все поверхности, которые должны быть выполнены с уклоном, и обозначить величину уклонов красным карандашом.

Определение размеров стержней и знаковых частей

В зависимости от положения стержневых знаков в форме они разделяются на горизонтальные и вертикальные. Длину горизонтальных l и высоту вертикальных $h(h_1)$ знаков определяют в зависимости от поперечного размера концевой части стержня ($a+b/2$ или D) и его длины L . Если концевая часть знака круглая, то в качестве поперечного сечения будет диаметр D , если прямоугольная – полусумма сторон $a+b/2$. Высоту верхних вертикальных знаков назначают несколько меньше высоты нижних: $h = (0,6-0,8)h_1$. За высоту h горизонтальных знаков принимают половину их толщин, т. е. $D/2$ или $b/2$. Длину и высоту знаков определяют по справочным таблицам.

Стержень вычерчивают на размеченном чертеже карандашом синего цвета. В разрезе стержень штрихуется сетчаткой штриховой, наносимой по его контуру. Если стержни вычерчиваются отдельно, необходимо указать все их размеры. Если отливка имеет несколько стержней, то на чертеже они обозначаются номерами – “ст1”, “ст2” и т.д., которые вписываются в изображение тела стержня.

Устройства и размеры моделей

Устройства и размеры моделей определяются по очертаниям и размерам отливки с учетом очертаний стержневых знаков и их размеров. Размеры модели назначаются по размерам отливки, но при

этом надо учитывать величину литейной усадки. На чертеже модели указывают размеры отливки, а на поле чертежа проставляют величину усадки. Корректировка размеров отливки производится в процессе изготовления моделей. Отдельные части моделей в большинстве случаев совмещаются с разъемом формы и соединяются (фиксируются) при помощи штифтов, располагаемых по разъему.

Размеченный чертеж отливки

Размеченный чертеж отливки выполняется непосредственно на чертеже детали. К проекционным изображениям детали дочерчиваются контуры отливки, которые отличаются от соответствующих контуров детали наличием припусков, напусков, уклонов и т.п. “Дочерчивание” контуров отливки выполняется красным карандашом. На проекциях чертежа, где деталь показана в разрезе, “дочерченная” часть отливки должна быть показана в разрезе, т.е. заштрихована красным карандашом. Направление штриховки то же, что и на чертеже детали.

Элементы литниковой системы следует вычертить на размеченном чертеже красным карандашом тонкими линиями. Толщину питателей условно изображают равной $1/3$ - $1/4$ толщины стенки элемента отливки, к которому подводится металл.

Совместное рассмотрение размеченного чертежа отливки с сохраненными контурами детали дает полное представление об очертаниях отливки и ее устройстве, а следовательно и об устройстве модели и литейной формы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беккерт М. Мир металлов. – М.: Мир, 1980.
2. Заббаров Р. Каргин В.Р. Жарова В.С. и др. Основные определения и термины металлургического производства: Учеб. пособие / СГАУ, – Самара, 2001. 52 с.
3. Иванов В.Н. Словарь-справочник по литейному производству. – М.: Машиностроение, 1990. 384 с.
4. Шихтовые материалы металлургического производства: Метод. указания. / Сост. Р. Заббаров; СГАУ, – Самара, 2002. 20 с.
5. Вакуумная металлургия / Под. ред. Р.Ф. Бунша. – М.: Иностранная литература, 1959.
6. Курдюмов А.В., Пикунов М.В., Чурсин В. М. Производство отливок из сплавов цветных металлов. – М.: Металлургия, 1986. 416 с.
7. Захаров А.М. Промышленные сплавы цветных металлов. – М.: Металлургия, 1980. 256 с.
8. Курдюмов А.В., Пикунов М.В., Чурсин В.М. Литейное производство цветных и редких металлов. – М.: Металлургия, 1982. 351 с.
9. Постников Н. С., Мельников А.В. Производство литых алюминиевых деталей. – М.: Металлургия, 1979. 136 с.
10. Лебедев Б.М., Мельников А.В., Николаенко В.В. Отливки из алюминиевых сплавов. – М.: Машиностроение, 1970. 216 с.
11. Галдин Н.М. Литниковые системы для отливок из легких сплавов. – М.: Машиностроение, 1978. 198 с.
12. Ливанов В. А., Габидулин Р.М., Шипилов В.С. Непрерывное литье алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1977. 168 с.
13. Непрерывное литье в электромагнитный кристаллизатор / З.Н. Гецелев, Г.А. Балахонцев, Ф.И. Квасов и др. – М.: Металлургия, 1983. 152 с.
14. Магниеые сплавы: Справочник / Под ред. М.Б. Альтмана. – М.: Металлургия, 1978. 296 с.
15. Никулин Л.В., Липчин Т.Н., Заславский М.А. Литье под давлением магниевых сплавов. – М.: Машиностроение, 1978. 181 с.
16. Бондарев Б.И. Плавка и литье деформируемых магниевых сплавов. – М.: Металлургия, 1973. 288 с.

17. Производство фасонных отливок из титановых сплавов / Е.Л. Бибииков, С.Г. Глазунов, А.А. Неустроев и др. – М.: Металлургия, 1983. 296 с.
18. Плавка и литье титановых сплавов / А.Л. Андреев, Н.Ф. Аношкин, К.М. Борзцовская и др. – М.: Металлургия, 1978. 383 с.
19. Неустроев А.А., Ходоровский Г.Л. Вакуумные гарниссажные печи. – М.: Металлургия, 1967. 272 с.
20. Добаткин В.И., Аношкин Н.Ф., Андреев А.Л.. Слитки титановых сплавов. – М.: Металлургия, 1966. 286 с.
21. Орлов Н.Д., Чурсин В.М. Фасонное литье из сплавов тяжелых цветных металлов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1971. 256 с.
22. Заббаров Р., Галанов С.П. Материалы и современные технологические процессы изготовления отливок и заготовок аэрокосмического назначения / СГАУ. – Самара, 2000. 148 с.
23. Заббаров Р., Уваров В.В., Ляченков Н.В. Основы металлургического производства и технология конструкционных материалов: Учеб. пособие / СГАУ. – Самара, 2002. 64 с.
24. Дроздов И.А., Заббаров Р. Термообработка и стойкость штамповых сталей: Метод. указания / СГАУ, – Самара, 2003. 62 с.
25. Филлипов Г.И. Литые заготовки и способы их получения: Учеб. пособие. – Л.: ЛПИ, 1983. 88 с.
26. Заббаров Р., Чемпинский Л.А., Уварова В.С. Конструирование отливок: Метод. указания / СГАУ. – Самара, 1985. 34 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

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 П1.2

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 - $t_{\text{C}^{\circ}} = 0,8_{\text{R}^{\circ}} = (t_{\text{F}^{\circ}} - 32)1,8 = (t_{\text{C}^{\circ}} - 273,16)\text{K}$.

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

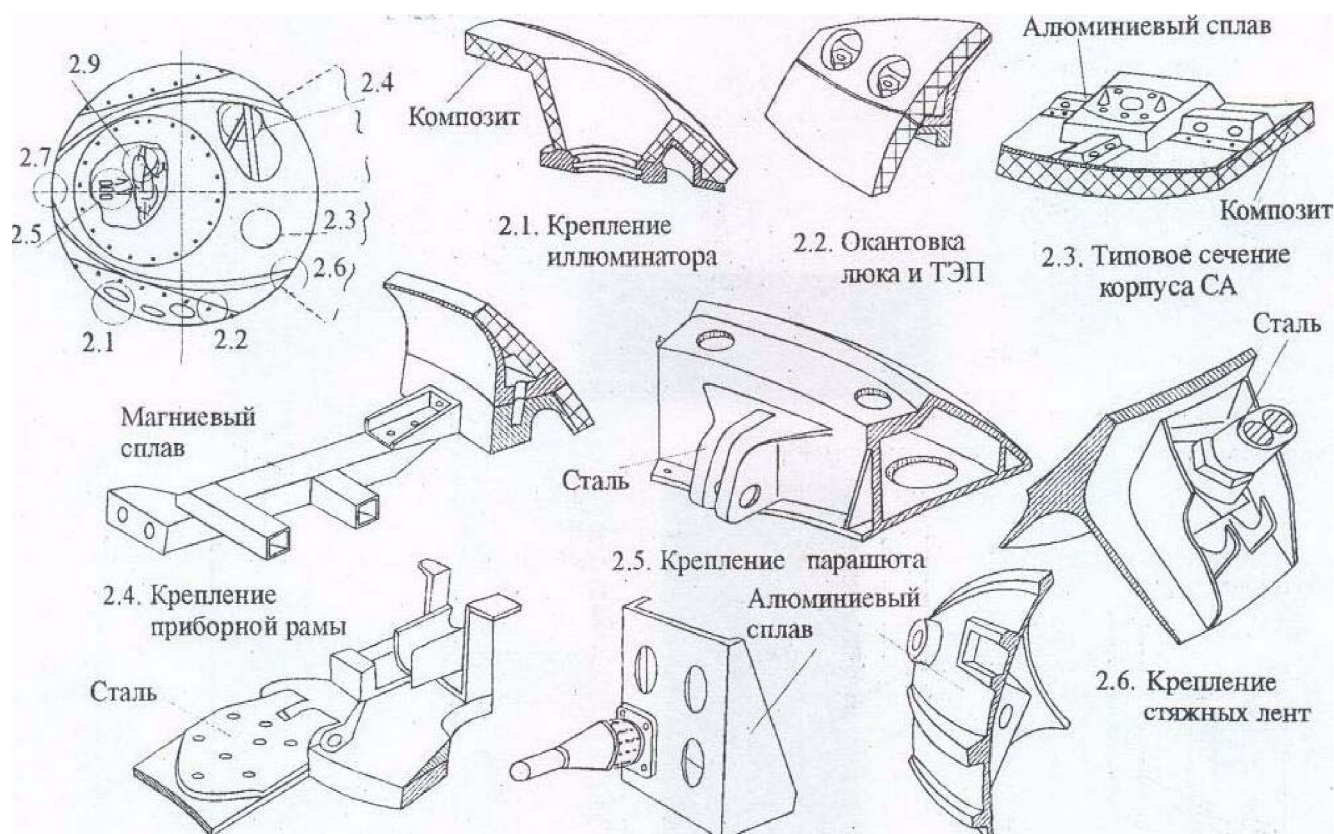
Элементы	Принятое обозначение эл-тов в марках металлов и сплавов		Элементы	Принятое обозначение эл-тов в марках металлов и сплавов		Элементы	Принятое обозначение эл-тов в марках металлов и сплавов	
	черных	цветных		черных	цветных		черных	цветных
Азот	А		Кадмий	Кд	Кд	Ртуть		Р
Алюминий	Ю	А	Кобальт	К	К	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	Вам	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		IT
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(Хр)
Индий		Ин	Празеодим		ПР	Церий		Се
Иридий		И	Рений		Ре	Цинк	Ц	Ц
Иттербий		ИТМ	Родий		Рд	Цирконий		ЦЭВ
Иттрий		ИМ				Эрбий		Эрм

Сравнительные значения твердости, измеренные различными методами

$P = 30000 \text{ Н}$ $D = 10 \text{ мм}$ $t = 10-15 \text{ с}$		Твердость по Роквеллу			Твердость по Виккерсу, МПа	Временное сопротивление σ_B , МПа
Диаметр отпечатка, мм	Твердость по Бринеллю, НВ	HRC	HRA	HRB		(углеродистые стали)
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. П1.6

1	2	3	4	5	6	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



2.7. Центральное крепление лент 2.8. Электрический разъем 2.9. Фрагмент контейнера парашюта

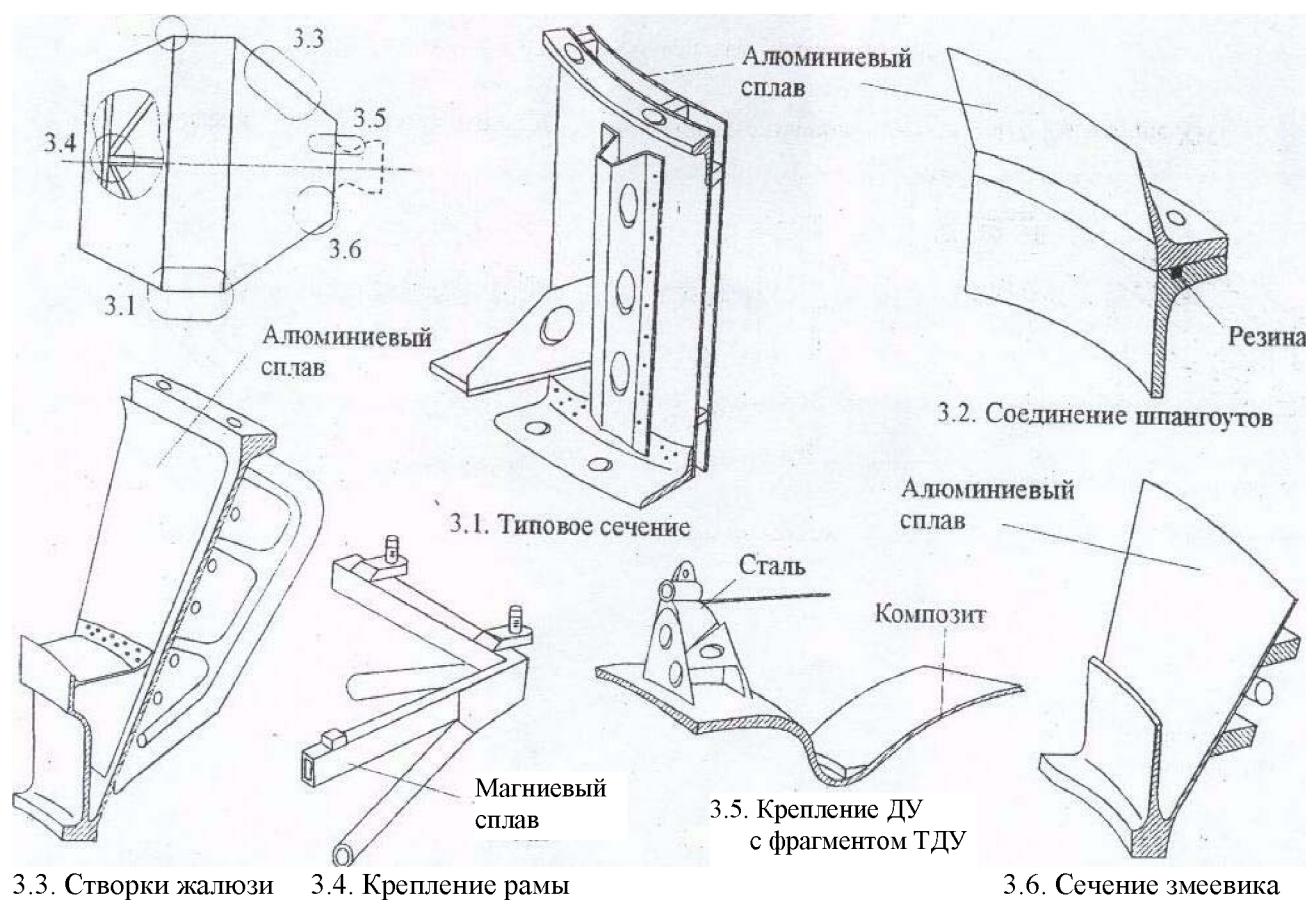
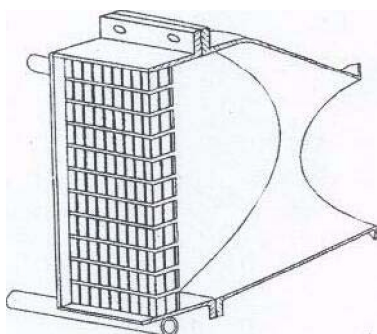
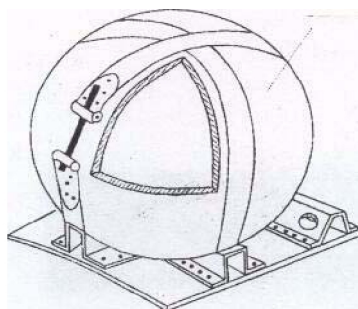


Рис. П2.2. Спускаемый аппарат АКА

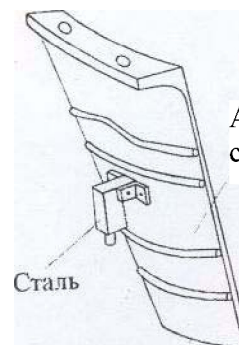
Титан



4.1. Радиатор



4.2. Узел крепления с баллоном

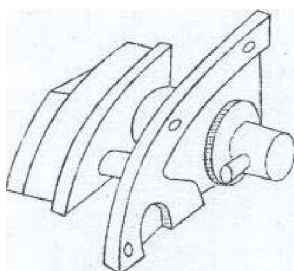


4.3. Крепление соплового блока

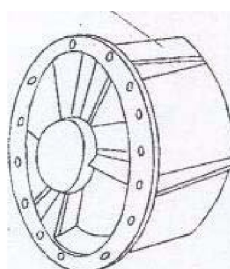
Алюминиевый
сплав

Сталь

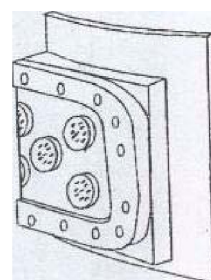
Пластмассы



4.4. Кронштейн

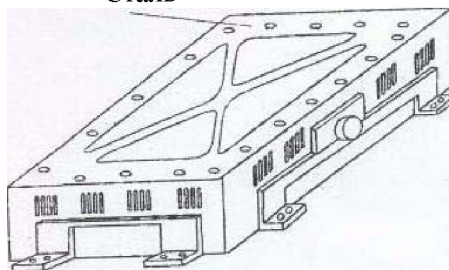


4.5. Вентилятор



4.6. Плита разъемов

Сталь



4.7. Крепление ХИТ

Рис. П2.3. Основные бортовые системы АКА

Учебное издание

Заббаров Рахим

ОСНОВЫ ПЛАВКИ И ЛИТЬЯ МЕТАЛЛОВ

Учебное пособие

Редактор Т. К. К р е т и н и н а

Корректор Н. С. К у п р и я н о в а

Компьютерная верстка Т. Е. П о л о в н е в а

Подписано в печать 18.02.06 г. Формат 60х84 1/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 9,6. Усл. кр.-отт. 10,0. Уч.-изд.л.10,75 .

Тираж 200 экз. Заказ . Арт. С- /2006

Самарский государственный

аэрокосмический университет .

443086 Самара, Московское шоссе, 34.

РИО Самарского государственного

аэрокосмического университета.

443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Таблица 29

Физические свойства титановых литейных сплавов

Марка сплава	Плотность, кг/м ³	Коэффициент термического линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, 1/град при температурах, °C											Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м · град при температурах, °C							Удельная теплоемкость C , кДж/кг · град при температурах, °C						$\rho \cdot 10^6$, Ом · см 20°C
		20-100	20-200	20-300	20-400	20-500	20-600	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	25	100	200	300	400	500	600	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	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

Химический состав никелевых жаропрочных литейных сплавов

Марка сплава	Массовая доля элементов, %																			
	С	Cr	Ni	Mo	W	Al	Ti	Nb	Co	Ce	Zr	B	Si	C	P	γ	Mn	Pb	Bi	Fb
	не более																		Прочие элементы	
ЖСЗ-ВИ	0,11...0,16	14,0...18,0	Ос- нова	3,0...4,5	4,5...6,0	1,6...2,2	1,6...2,3	-	-	-	-	0,005	0,6	0,009	0,015	-	0,6	-	-	8,0
ЖСЗДК-ВИ	0,06...0,11	11,0...12,5	-//-	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
ЖС6К-ВИ	0,13...0,20	9,5...5,2	-//-	3,5...4,5	4,5...5,5	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...8,0	0,02	0,2	0,02	0,2	0,015	0,015	-	0,4	0,001	0,0005	1,0
ЖС6У-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
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
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	-	-	-	-	0,09	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	-	-	-	-	0,065	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
ВЖЛ12Э-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
ВЖЛ14Н-ВИ	0,03...0,08	18,0...20,0	-//-	4,0...5,0	-	1,2...1,5	2,5...2,9	1,8...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
ВХ4Л-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
ВХ9Л-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

Таблица 43

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	Si	Mn	C	Ti	Al	S	P
														не более						
Х18Н9БЛ	-//-	17...20	8...12	8С*...0,9	-//-	-//-	-//-	-//-	-//-	-//-	-//-	-//-	-//-	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
ЭИ268Л	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...0,05	-//-	-//-	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
Х13НЗВФЛ	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
Х17НЗСЛ	0,05...0,12	15...18	2,8...3,8	-//-	-//-	-//-	0,8...1,5	0,3...0,8	-//-	-//-	-//-	-//-	-//-	-//-	-//-	0,07	-//-	-//-	0,03	0,03
Х24Н8М2ДЗЛ (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 47

Технические возможности различных способов литья

Способ литья	Максимальная масса отливки, кг	Максимальный габаритный размер, мм	Толщина стенки, мм (не менее)	Диаметр отверстия, мм (не менее)	Литейный уклон, град	Радиус закругления, мм (не менее)	Класс точности	Класс шероховатости	Припуски на обработку, мм
Под давлением	30	700	0,5-1,0	1,5-2,0	0,5-1,0	0,5	1-3	5-8	0,3-1,5
В кокиль	500	2000	3-5	8	0,5-2,5	3	4-6	2-4	1,5-8,0
Под низким давлением	10	800	2-3	8	1-2	2	3-5	3-5	1,5-4,0
В оболочковые формы	50	1500	3-6	6	1-2	5	4-6	3-5	2-8
В гипсовые формы	10	250	1,5-3,0	6	1	5	4-6	3-5	2-5
По выплавляемым моделям	30	1000	1-3	5	1-2	5	3-5	4-6	0,2-0,7
В песчаные формы	1000	3000	4-8	15	0,5-3,0	5	5-7	1-4	2-14