

С. И. Репях

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ ЛИТЬЯ ПО
ВЫШЛАВЛЯЕМЫМ
МОДЕЛЯМ

УДК 621.74.048
ББК 34.611.5
Р-41

Рецензенты:
Доктор технических наук, проф. В.Е. Хрычюк
Доктор технических наук, проф. В.В. Луние
Доктор технических наук, проф. О.И. Пономаренко

Р-41 Релев С.И.
Технологические основы литья по выплавляемым моделям. –
Днепропетровск: Лира, 2006. – 1056 с.

ISBN 966-383-070-0

В книге рассмотрены способы получения отливок методом литья по выплавляемым моделям, вопросы конструирования отливок и литниково-питающих систем, способы изготовления пресс-форм, моделей и модельных блоков, керамических, графитовых и водорастворимых стержней, а также способы изготовления и подготовки к заливке керамических и графитовых оболочковых форм, монолитных гипсовых форм. Приведены характеристики, составы и свойства литейных сплавов, дано описание плавильных агрегатов, технологий ливки, способов рафинирования и модифицирования сплавов. Рассмотрены механизмы формирования дефектов отливок в условиях равноосной и направленной кристаллизации металлов, влияние неметаллических включений и растворенных газов на свойства сплавов и качество отливок. Приведены описания финишных операций изготовления отливок. Представлена классификация дефектов отливок, определены основные причины образования дефектов в отливках и рекомендации по предупреждению образования дефектов.

Для инженерно-технических работников предприятий, студентов, аспирантов и преподавателей вузов металлургического и машиностроительного профиля.

УДК 621.74.045
ББК 34.611.5

© Релев С. И. 2006
Днепропетровск: Лира, 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. СПЛАВЫ ДЛЯ ОТЛИВОК	11
Глава 2. КОНСТРУИРОВАНИЕ ОТЛИВОК, ПРЕСС-ФОРМЫ	106
2.1. Принципы конструирования отливок	107
2.2. Точность отливок	130
2.3. Пресс-формы	140
Глава 3. ЛИТНИКОВО – ПИТАЮЩИЕ СИСТЕМЫ	168
3.1. Литниково-питающие системы для заливки форм под действием гравитации	169
3.2. Элементы литниково-питающих систем	177
3.3. Расчёт размеров литниково-питающих систем типа I–III	214
3.4. Расчёт литниково-питающих систем типа IV (обратный стояк) для отливок из магнитных сплавов	226
3.5. Расчёт размеров прибылей атмосферного давления и питающих элементов литниковой системы типа V–VIII	227
3.6. Холодильники	254
3.7. Расчёт сечений литников и параметров заливки форм с литниково-питающими системами типа V–VIII	269
3.8. Выбор места и способа подвода расплава в отливку, условий заливки	276
3.9. Литниково-питающие системы для отливок, получаемых методом направленной кристаллизации	283
3.10. Литниково-питающие системы для центробежного литья с вертикальной осью вращения	289
3.11. Техничко-экономические показатели литниково-питающих систем	296
Глава 4. СТЕРЖНИ	298
4.1. Стержни керамические	300
4.2. Методы контроля качества керамических стержней	332
4.3. Стержни графитовые	335
4.4. Стержни водорастворимые	337
4.5. Подготовка стержней к установке в пресс-форму	341
Глава 5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ МОДЕЛЕЙ И МОДЕЛЬНЫХ БЛОКОВ	344
5.1. Требования к выплавляемому модельному составу	345
5.2. Материалы для модельных составов	355
5.3. Классификация, характеристика и свойства модельных составов	367
5.4. Изготовление модельных составов	381
5.5. Контроль качества модельных составов	385
5.6. Изготовление моделей	398
5.7. Охлаждение, ремонт и хранение моделей	417
5.8. Сборка (монтаж) и хранение модельных блоков	425
5.9. Дефекты моделей	430
5.10. Регенерация модельных составов	435
Глава 6. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФОРМ	444
6.1. Многослойные керамические оболочковые формы	444
6.2. Материалы для изготовления многослойных керамических оболочковых форм	447
6.3. Огнеупорные суспензии	482
6.4. Формирование огнеупорного покрытия на модельном блоке	528

6.5. Выставление модельной состава из форм	556
6.6. Контроль качества керамической оболочковых форм	569
6.7. Роль мелкозернистой толшины кварцевой керамической оболочкой формы	585
6.8. Дефекты многослойных керамических оболочковых форм	587
6.9. Ремонтная электрокорунд и дисперс-силлиманита	590
6.10. Мокротельные формы на основе гипса	592
Глава 7. ПОДГОТОВКА ФОРМ К ЗАЛИВКЕ	600
Глава 8. ПЛАВКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	629
8.1. Длительность плавления	629
8.2. Расход шихты	643
8.3. Индукционная тигельная печь	652
8.4. Плавка сталей и марганцевых сплавов на основе железа	678
8.5. Плавка чугуна	694
8.6. Плавка меди и медных сплавов	698
8.7. Плавка алюминиевых сплавов	710
8.8. Плавка магниевых сплавов	716
8.9. Плавка никелевых сплавов	723
8.10. Плавка кобальтовых сплавов	737
8.11. Плавка титановых сплавов	738
Глава 9. ГАЗЫ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ	743
Глава 10. ФИЛЬТРАЦИОННОЕ РАФИНИРОВАНИЕ РАСПЛАВОВ	775
Глава 11. ЗАЛИВКА ФОРМ	
ЗАТВЕРЖДЕНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ ОТЛИВКОВ	
11.1. Заливка форм	787
11.2. Затвердевание отливок	789
11.3. Направленная кристаллизация отливок	807
11.4. Осадочные отливки	851
Глава 12. ВЫБИВКА, ОБРУБКА И ОЧИСТКА ОТЛИВКОВ. УДАЛЕНИЕ СЕРЖИЕЙ	881
Глава 13. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОТЛИВКОВ	886
Глава 14. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОТЛИВКОВ	904
Глава 15. БРАК И КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ОТЛИВКОВ	923
Глава 16. ФОРМИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОТЛИВКОВ	939
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Физические свойства химических элементов	983
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Оборудование для подготовки модельной состава х затвердевание в пресс-формы и изготовления моделей	1010
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Оборудование для приготовления и хранения интерметаллических сплавов	1011
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Оборудование для обработки модельных блоков зернистым материалом и сушки слоев огнеупорного покрытия	1015
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Оборудование для выплавки модельной состава из форм	1018
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Оборудование для прокаливания форм	1023
ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Традиционные названия химических веществ	1025
ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Контроль подобия	1030
ПРИЛОЖЕНИЕ 9. Рабочий шаблон для индукционных тигельных печей	1033
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	1034
	1035

Метод получения литых изделий в формы, изготовленные по восковой выплавляемой модели, использовался литейщиками издавна и по праву относится к числу наиболее старейших способов получения литых изделий. Тем не менее, свой промышленное воплощение метод литья по выплавляемым моделям получил лишь в середине XX века. В настоящее время этим методом изготавливают ювелирные художественные и медицинские изделия, детали бытовой техники, инструмент (режущий и измерительный), магниты, детали нефтебурового оборудования, детали для машин и агрегатов сельского хозяйства, химической и пищевой промышленности, детали мотоциклов и автомобилей, дизельных двигателей и двигателей систем внутреннего сгорания, двигателей судов и кораблей, авиационных и ракетных двигателей, и пр.

Получаемые данным методом литые детали успешно конкурируют с деталями, изготовленными из горячих и холодных штампов, металлических порошков, механической обработкой из проката или кованных заготовок.

Литые детали, по сравнению с деталями, изготовленными вышеуказанными способами, обладают рядом преимуществ, а именно: меньшей стоимостью, возможностью получения сложных криволинейных поверхностей, внутренних полостей и выступов, расположенных в различных плоскостях, при минимальной механической обработке, что особенно важно при изготовлении деталей из труднообрабатываемых материалов (титана, жаропрочных никелевых сплавов, легированных сталей и т.п.), возможностью обеспечения максимального приближения отливки к форме готовой детали, что резко снижает объем механической обработки; однородностью механических свойств по всем направлениям, в отличие от деталей, полученных из деформированных заготовок.

Уникальность метода литья по выплавляемым моделям состоит в возможности изготовления деталей, практически, любой конфигурации, массой от долей грамма до 200 килограммов и более, со стенками толщиной до 0,2 мм, габаритными размерами до 1500 мм и более, с допуском на отклонение $+ 0,05 \dots - 0,1$ мм, из сплавов любого типа, в том числе на основе железа, никеля, кобальта, ниобия, хрома, меди, титана, алюминия, магния, золота, серебра, платины и т.д.

Методом литья по выплавляемым моделям получают отливки не только из самых разных сплавов, но и с самой разнообразной макроструктурой, а именно: равноосной (в том числе гранулярной), смешанной, транскристаллитной, направленно-столбчатой и монокристаллической. Отсутствие разрыва формы обеспечивает изготавливаемым отливкам, по сравнению с другими видами литья, повышенную геометрическую точность и точность массы, а применение мелкодисперсных наполнителей в жидких связующих материалах, используемых для изготовления керамических оболочковых форм (КО), позволяет получать отливки с шероховатостью поверхности вплоть до $Ra=1,25$ мм (ГОСТ 2789-73).

Себестоимость тонны отливок, получаемых методом литья по выплавляемым моделям, в 1,5...10 раз и более, выше себестоимости отливок, получаемых в песчанно-глинистые формы, но на 20...90% ниже себестоимости деталей, изготовленных механической обработкой из поковок. Применение точных литых заготовок взамен деформируемых позволяет снизить объем механической обработки в 3...10 раз и в 5...10 раз повысить коэффициент использования металла, существенно снизить трудоемкость изготовления детали.

Кроме этого, следует учитывать, что в ряде случаев метод выплавляемых моделей позволяет получать отливки такого качества и сложности, которые невозмож-

не доста при любом другом, известном на сегодняшний день, методе литья и способе обработки металла.
Схема типового технологического процесса изготовления отливок методом литья по выплавляемым моделям представлена на рис. 1

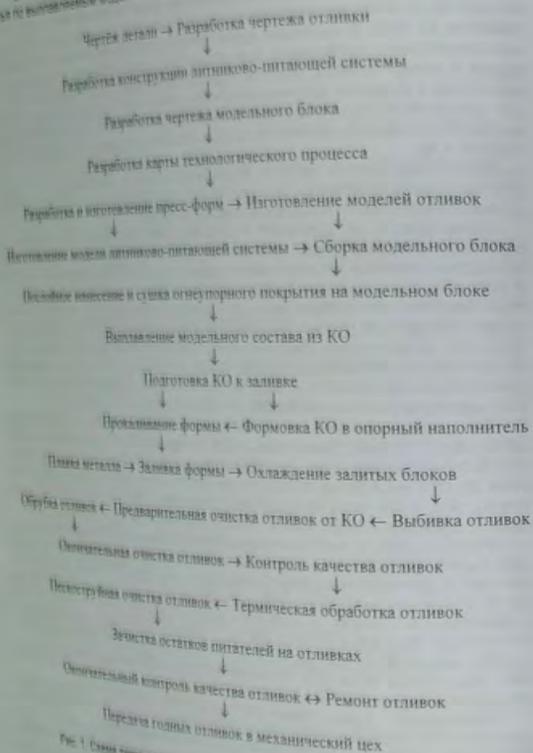


Рис. 1. Схема типового технологического процесса изготовления отливок методом литья по выплавляемым моделям

По сути технология получения отливок методом литья по выплавляемым моделям состоит из нескольких этапов, иллюстрацией которых является схема, представленная на рис. 2

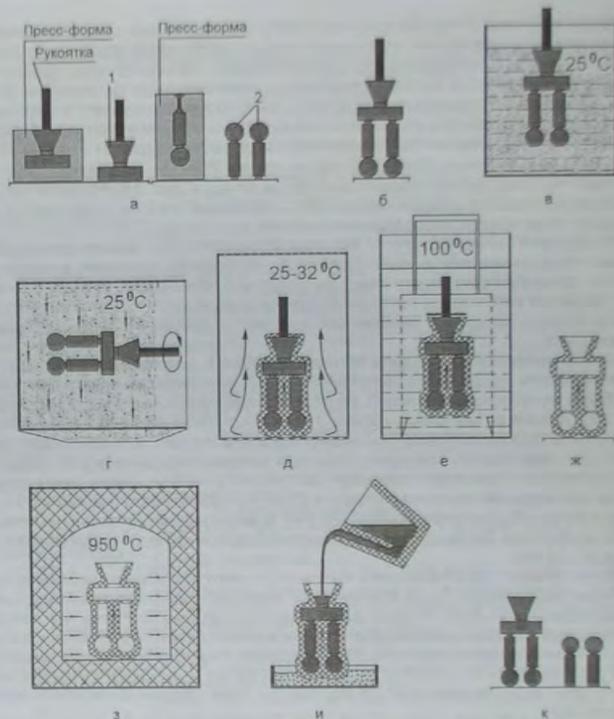


Рис. 2. Иллюстрационная схема технологического процесса изготовления отливок методом литья по выплавляемым моделям

Согласно схеме, представленной на рис. 2, первым этапом технологии является изготовление легкоплавких моделей отливки и элементов литниково-питающей системы (ЛПС). Модель будущей отливки (2) и элементов ЛПС (1) изготавливают из легкоплавкого ($t_{пл}=42...60^{\circ}\text{C}$) воскоподобного сплава — модельного состава (модельной массы, модельного воска) с использованием пресс-формы.

Пресс-форма представляет собой сборную конструкцию, как правило, металлическую, рабочие элементы которой оформляют различные поверхности изготавливаемой в ней модели. По сути, пресс-форму можно рассматривать как форму, предназначенную для получения в ней отливки из воскообразного материала (модельного состава).

Для этого модельный состав расплавляют и, медленно охлаждая и перемешивая, доводят по консистенции до пастообразного (сметанообразного) состояния.

Классификация цехов по производству литья по выплавляемым моделям

Виды цехов	Характеристика
По виду сплава	
Стального литья	Производство отливок общемашиностроительного назначения из углеродистых и легированных сталей, деталей автомобилей, тракторов, сельскохозяйственных машин, станков, приборов, швейных машин, велосипедов и т.п.
Специального литья	Производство отливок из коррозионно-стойких, жаростойких, жаропрочных сталей, магнитных и других специальных сплавов.
Инструментального литья	Производство отливок из сталей и сплавов высокой твердости и износостойкости для режущего и измерительного инструмента.
Цветного литья	Производство отливок из алюминиевых, медных, магниевых, титановых и других сплавов на основе цветных металлов.
Чугунного литья	Производство отливок из чугуна.
По массе отливок	
Мелкого литья	Средняя масса отливок до 0,1 кг
Среднего литья	Средняя масса отливок от 0,1 до 0,5 кг
Крупного литья	Средняя масса отливок более 0,5 кг
По объёму производства	
С малым выпуском	Выпуск до 1000 т отливок в год
Со средним выпуском	Выпуск 1000–2500 т отливок в год
С большим выпуском	Выпуск более 2500 т отливок в год
По сериности производства	
Массового производства	Выпуск малой номенклатуры отливок в большом количестве
Серийного производства	Выпуск широкой номенклатуры отливок в большом количестве
Единичного производства	Широкая номенклатура отливок изготавливаемых в малом количестве отдельными заказами
По степени механизации	
Механизированно-ручного производства	Выполнение технологических процессов, в основном, вручную с помощью простейших механизмов и инструментов, облегчающих труд и ускоряющих производство
Механизированный	Выполнение технологических процессов, в основном, с помощью машин и механизмов, получающих энергию от специального источника. Управление машинами и механизмами, выполнение вспомогательных процессов и операций осуществляют вручную
Комплексно-механизированный	Выполнение всех технологических процессов основного и вспомогательного производства с использованием машин, механизмов, приборов и других средств механизации. Допускается на отдельных операциях, процессах и в подразделах ручной труд
Автоматизированный	Выполнение технологических процессов основного производства с помощью автоматов, автоматических линий и других средств автоматизации производства. Вспомогательные работы и процессы выполняются с помощью различных средств механизации с элементами автоматизации отдельных работ. Допускается на отдельных операциях, процессах и в подразделах механизированный и ручной труд
Комплексно-автоматизированный	Выполнение всех технологических процессов основного и вспомогательного производства с помощью автоматического оборудования и устройств. За работающими остаются только функции наблюдения, регулирования и управления ходом заданного технологического процесса. Допускается на отдельных операциях, процессах и в подразделах механизированный и ручной труд
По сложности отливок	
Простого литья	Производство, в основном, простых и несложных отливок
Средней сложности литья	Производство, в основном, отливок средней сложности
Уникального литья	Производство, в основном, особо сложных отливок

Классификация цехов литья по выплавляемым моделям по типу производства отливок приведена в табл. 2 [183].

Подготовленным таким образом пастообразным модельным составом заполняют специальный шприц, при помощи которого пастообразный модельный состав затекают в металлическую (пластмассовую, гипсовую) пресс-форму. В пресс-форме модельный состав затекает и охлаждается до температуры, близкой к комнатной. После охлаждения модели пресс-форму раскрывают и извлекают из нее копию модели (см. рис. 2.в) точно копирующую форму внутренней (рабочей) полости пресс-формы. Полученные модели отливок прилаивают к модели ЛПС, чей контур пресс-формы. В результате выполнения этой технологической операции получают так называемый модельный блок (см. рис. 2.б). Процесс крепления моделей к модели ЛПС путем прилаивания, склеивания и т.п. называют сборкой (монтажом) модельного блока.

Специальным способом технологии является изготовление КО. Для изготовления КО используют специальную огнеупорную суспензию. Огнеупорная суспензия, в основном, состоит из жидкого связующего вещества (например, кремнезема, жидкого стекла и т.п.), вещества-разбавителя-растворителя (например, воды) и твердого пылевидного огнеупорного материала-наполнителя огнеупорной суспензии (например, кварца пылевидного).

Перед одоразового окукания модельного блока в суспензию (см. рис. 2.в) на его поверхность наносят слой суспензии, который непосредственно после извлечения блока из суспензии, обсыпает мелкозернистым огнеупорным материалом (см. рис. 2.г), например, кварцевым песком. Нанесенный таким образом на модельный блок слой огнеупорного покрытия — сушат на воздухе (см. рис. 2.д). В процессе сушки из слоя огнеупорного покрытия испаряется растворитель-разбавитель огнеупорной суспензии и происходит твердение связующего вещества. После сушки, технологические операции окукания, обсыпки и сушки повторяют несколько раз (от 3-х до 12-ти и более). В результате повторения этих технологических операций на поверхности модельного блока формируется керамическое покрытие определенной толщины (4–15 мм).

По окончании сушки последнего слоя огнеупорного покрытия по периметру торца литейной воронки блока керамическое покрытие подрезают, например, с помощью абразивного круга. Выплавление модельного состава из внутренней полости многопалочного керамического покрытия осуществляют путем нагрева блока, например, в воде при температуре 95–98°C. В процессе нагрева блока, модельный состав размягчается и удаляется из внутренних полостей покрытия блока (см. рис. 2.е). С этого момента керамическое покрытие называют керамической оболочкой формы (КО).

После выплавки модельного состава КО извлекают из воды и проваливают на воздухе в течение суток (см. рис. 2.ж). В дальнейшем, с целью удаления из КО остатков модельного состава, снижения ее газостойкости и т.п., КО промывают (обсыпая) при температуре 850–950°C (см. рис. 2.з) и в горячем состоянии заливают жидким металлом (см. рис. 2.и).

Благодаря расплаву КО охлаждают до комнатной температуры. После охлаждения с поверхности залитого блока удаляют КО, а отливки отделяют от ЛПС (см. рис. 2.к). Полученные отливки очищают от остатков КО, а отливки отделяют от ЛПС (см. рис. 2.к). Голые отливки контролируют качество отливок и, в случае необходимости, остаточного контроля передают в механический цех.

Изготовление литья методом выплавляемых моделей осуществляется как в специальном цехе, так и на участках, входящих в состав литейного цеха другого предприятия. Специализированные цехи литья по выплавляемым моделям классифицируют по признакам, приведенным в табл. 1 [153].

Классификация цехов по типу производства отливок

Группы отливок по массе, кг	Годовое количество отливок одного наименования по типу производства, шт				
	единичное, менее	мелкосерийное	серийное	крупносерийное	массовое, более
до 0,063	100	1001-50000	50001-220000	220001-1100000	1100000
0,063-0,16	800	801-20000	20001-160000	160001-850000	850000
0,16-0,25	650	651-20000	20001-130000	130001-850000	650000
0,25-0,63	550	501-15000	15001-100000	100001-500000	500000
0,63-1,00	350	351-10000	10001-70000	70001-350000	350000
1,00-4,00	200	201-5000	5001-35000	35001-220000	220000
4,00-10,00	100	101-1000	1001-20000	20001-125000	125000
10,00 и более	50	51-500	501-12000	12001-70000	70000

Подвешиваемое количество отливок, производимых цехами литья по выплавляемым моделям, изготавливают из нелегированных (углеродистых) конструкционных сталей. В значительно меньшем количестве изготавливают отливки из легированных и высоколегированных сталей. При этом литье стали, как правило, проводят в индукционных тигельных печах открытого типа. Производимые стальные отливки имеют, в основном, равноосную, транскристаллитную или смешанную макроструктуру и характеризуются достаточно высоким уровнем механических и эксплуатационных свойств, а также надежностью и долговечностью.

Основными потребителями стальных отливок являются предприятия автомобильного и тракторостроения, предприятия химической и пищевой промышленности, предприятия по производству товаров бытовой техники и т.п.

Одним из крупнейших потребителей отливок из жаропрочных никелевых, кобальтовых, хромовых сплавов и т.п., являются предприятия авиационного и судового двигателестроения. Из числа отливок, производимых из жаропрочных сплавов, наибольшему долу литья составляют лопатки из сплавов на никелевой основе, которые производят в условиях вакуума с равноосной, направленно-слоистой, монокристаллической и гранулярной структурой (см. рис. 3).

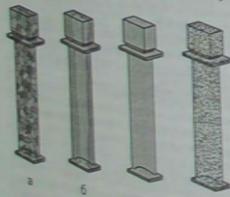


Рис. 3. Отливки с макроструктурой: а - равноосной, б - направленно-слоистой, в - монокристаллической, г - гранулярной

Отливки из сплавов на основе меди, алюминия и магния получают как в КО, так и в монокристаллические формы. Для отливок, изготавливаемых из легкоплавких цветных сплавов, в общем объеме выпуска литья методом выплавляемых моделей выпуска товаров широкого потребления, а также в химической, судостроительской, пищевой и приборостроительной промышленности.

Глава 1. СПЛАВЫ ДЛЯ ОТЛИВОК

Как и в других видах литья, в литье по выплавляемым моделям выбор сплава является важным этапом в процессе разработки технологии получения литой детали требуемого качества и с заданным уровнем требуемых свойств.

Для выбора литейного сплава, исходя из назначения литой детали и условий ее работы, прежде всего, используют данные о требованиях, предъявляемых к материалу отливки. При этом требования и, соответственно, свойства металла отливок ранжируют, то есть отдают первостепенное значение (приоритет) лишь некоторым основным свойствам, показатели которых в последствии регламентируют.

Исходя из приоритетных требований, определяют основу сплава литой детали, а исходя из уровня приоритетных показателей (свойств) назначают соответствующую марку сплава. Как правило, при выборе марки сплава для той или иной литой детали учитывают его механические, технологические и эксплуатационные свойства, ремонтпригодность.

Механические свойства. Под механическими свойствами понимают характеристики металла (сплава), определяющиеся его поведением под действием приложенных внешних механических нагрузок. К числу механических свойств, как правило, относят сопротивление металла деформации (прочность) и сопротивление к разрушению (пластичность, вязкость), а также способность металла не разрушаться при наличии трещин.

Для определения уровня механических свойств проводят механические испытания специальных образцов, изготовленных из этих металлов (сплавов). В результате проведения механических испытаний получают определенные числовые значения механических свойств, которые, по сути, являются величинами напряжений или деформаций, при которых происходят изменения физического и механического состояний образца, изготовленного из испытуемого металла (сплава).

При оценке механических свойств металлов (сплавов) используют три группы критериев.

Группа 1. Критерии, определяемые независимо от конструктивных особенностей и характера службы изделия (литой детали). Данные критерии находят путем проведения стандартных испытаний гладких образцов на растяжение, сжатие, изгиб, твердость (статические испытания) или стандартных образцов с надрезом на ударный изгиб (динамическое испытание).

Группа 2. Критерии оценки конструкционной прочности материала, то есть критерии, которые находятся в наибольшей корреляции со служебными свойствами данного изделия (литой детали) и характеризуют работоспособность материала в условиях эксплуатации (надежность и долговечность).

Критерии конструкционной прочности металлических материалов можно разделить на две подгруппы, к одной из которых относятся критерии, определяющие надежность металлических материалов против внезапных разрушений (вязкость разрушения, живучесть и др.).

Надежность — свойство литой детали выполнять возложенные на нее функции, сохраняя при этом эксплуатационные показатели в заданных пределах, в течение требуемого времени или сопротивление материала хрупкому разрушению (как правило, хрупкое разрушение детали возникает при работе детали при низкой температуре, при наличии в детали трещин, при повышенных остаточных напряжениях в детали, а также при развитии усталостных процессов и коррозии материала детали).

К другой подгруппе относятся критерии, которые определяют долговечность изделия (сопротивление усталости, износостойкость, сопротивление коррозии и т.д.).

Долговечность – способность детали сохранять работоспособность до ее окончательного состояния безвозвратного износа металла, процессами износа поверхности детали износ и другими факторами, вызывающими постепенное разрушение детали, но не являющийся за собой возникновения аварийной ситуации, достигающий детали, но не являющийся за собой возникновения аварии.

Долговечность – способность детали сохранять работоспособность до ее окончательного состояния безвозвратного износа металла, процессами износа поверхности детали износ и другими факторами, вызывающими постепенное разрушение детали, но не являющийся за собой возникновения аварийной ситуации, достигающий детали, но не являющийся за собой возникновения аварии.

Для большинства литых сплавов наиболее часто определяемыми механическими свойствами являются прочность, упругость, вязкость, твердость. Зная механические свойства, проводят обоснованный выбор соответствующего материала, обосновывают надежность и долговечность литой детали при ее минимальной массе.

Механические свойства определяют поведение материала при деформации и разрушении от действия внешних нагрузок:

- при статическом нагружении испытываемого образца (нагрузка на образец возрастает медленно, равномерно и равномерно);

- при динамическом нагружении испытываемого образца (нагрузка возрастает с большой скоростью и имеет ударный характер);

- при повторно-переменном или циклическом нагружении испытываемого образца (нагрузка в процессе испытания многократно изменяется по величине или по величине и направлению).

В результате проведения механических испытаний получают следующие характеристики прочности и пластичности материала.

Прочность – способность материала сопротивляться деформациям и разрушению.

Истинный предел пропорциональности ($\sigma_{п0}$) – напряжение, соответствующее упругой упругой деформации.

Временный предел упругости ($\sigma_{в0}$) – наибольшее напряжение, которое может выдержать материал не обнаруживая признаков остаточной деформации при разрыве.

Истинный предел упругости ($\sigma_{в0}$) – максимальное напряжение, до которого образцовый материал не получает остаточной деформации или напряжения, которому соответствует остаточная деформация 0,05%.

Предел текучести характеризует сопротивление материала небольшим пластическим деформациям.

В зависимости от пороков материала используют физический или условный предел текучести.

Физический предел текучести (σ_T) – это напряжение, при котором происходит увеличение деформации при постоянной нагрузке.

Условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$) – это напряжение, вызывающее остаточную деформацию 0,2%.

Предел прочности (σ_B) – напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, которую выдерживает образец до разрушения (временное сопротивление разрыву).

Условное сопротивление разрыву (разрыву) (S_B) – это максимальное напряжение, которое выдерживает материал в момент, предшествующий разрушению образца.

Пластичность – способность материала к пластической деформации, т.е. способность получать остаточное изменение формы и размеров без нарушения сплошности.

Относительное удлинение (δ) – показатель, характеризующий пластичность материала, отношение приращения длины образца к его начальной длине.

Относительное сужение (ψ) – показатель, характеризующий пластичность материала, отношение уменьшения площади поперечного сечения образца к его начальной площади поперечного сечения (пластичные материалы более надежны в работе, так как у них меньше вероятность опасного хрупкого разрушения).

Твердость – это сопротивление материала проникновению в его поверхность стандартного тела (индентора), не деформирующегося при испытании.

Ударная вязкость – показатель надежности материала, характеризующий его способность сопротивляться хрупкому разрушению.

Порог хладоломкости – температурный интервал изменения характера разрушения, являющийся важным параметром конструкционной прочности. Чем ниже порог хладоломкости, тем менее чувствителен металл к концентраторам напряжений (резкие переходы толщин от стенки к стенке, отверстия, пазы, риски), к скорости деформации.

Усталость – разрушение материала при повторных знакопеременных напряжениях, величина которых не превышает предела текучести.

Усталостная прочность – способность материала сопротивляться усталости.

Предел выносливости (σ_{-1}) – при симметричном изменении нагрузки, σ_n – при несимметричном изменении нагрузки) – максимальное напряжение, выдерживаемое материалом за произвольно большое число циклов нагружения.

Ограниченный предел выносливости – максимальное напряжение, выдерживаемое материалом за определенное число циклов нагружения или время.

Живучесть – разность между числом циклов до полного разрушения и числом циклов до появления усталостной трещины.

Технологические свойства. Технологические свойства характеризуют материал с точки зрения возможности получения из него литой детали с заданным уровнем свойств и качества. В число технологических свойств входят: литейные свойства (жидкотекучесть, заполняемость, усадка, трещиностойкость и т.п.), склонность материала к обработке давлением (способность материала, не разрушаясь, изменять размеры и форму под влиянием внешних нагрузок), свариваемость (способность материала образовывать неразъемные соединения требуемого качества), способность к обработке резанием (способность материала поддаваться обработке различным режущим инструментом).

Эксплуатационные свойства. Эксплуатационные свойства характеризуют способность материала работать в конкретных условиях. К числу эксплуатационных свойств относят:

Износостойкость – способность материала сопротивляться поверхностному разрушению под действием внешнего трения;

Коррозионная стойкость – способность материала сопротивляться действию на него агрессивных кислотных и (или) щелочных сред;

Жаростойкость – способность материала сопротивляться окислению в газовой среде при высокой температуре;

Жаропрочность – способность материала сохранять свои свойства при высокой температуре;

Хладостойкость – способность материала сохранять пластические свойства при отрицательной температуре;

антифрикционная – способность материала прирабатываться к другому материалу в условиях взаимного трения.

Кроме вышеперечисленных эксплуатационных свойств, существует ряд других, таких как термическая стойкость, абразивостойчивость и т.п.

Эксплуатационные свойства материалов определяют путем проведения специальных испытаний, которые назначаются в зависимости от условий работы детали или изделия.

Помимо вышеизложенного, при выборе сплава учитывают технологические возможности используемого в цехе оборудования, особенности выплавки сплава, а также особенности технологического процесса получения отливок из того или иного сплава, в том числе удельную плотность и температуру его плавления (температура ликвидус).

Поскольку температура ликвидус и удельная плотность любого технического сплава близки к температуре плавления и удельной плотности металла его основы для ориентировки в табл. 1.1 приведены значения удельной плотности некоторых металлов при 20°C (ρ_{20}) и температуре их плавления ($t_{пл}$) при нормальных условиях (н.у.).

Таблица 1.1

Плотность и температура плавления металлов [55]

Параметр	Металл										
	Mg	Al	Cu	Ni	Co	Fe	Ti	Cr	Nb	Mo	W
$t_{пл}, ^{\circ}\text{C}$	651	1656,7	1063	1455	1495	1539	1668	1890	2500	2620	3382
$\rho_{20}, \text{кг/м}^3$	1740	2701	8960	8900	8900	7850	4500	7190	8570	10200	19300

В литейно-выплавляемых моделях наибольшее количество отливок изготавливается из сплавов на железной основе, к числу которых относятся стали, чугуны и магниевые сплавы.

Сталь – многокомпонентный железоуглеродистый сплав, у которого содержание углерода (по массе) не превышает 2,14%, что соответствует точке E на диаграмме состояния железо-углерод (Fe-C), представленной на рис.1.1.

На диаграмме состояния Fe-C выделяют две области железоуглеродистых сплавов – область сталей и область чугунов. Основное условие разграничения данных областей – предельная растворимость углерода в аустените, по массе. Сталь содержит до 2,14% C, чугуны содержат от 2,14% до 6,67% C. Железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода более 6,67% промышленного значения не имеют.

Свойства сталей и чугунов во многом зависят от их структуры, которая, в свою очередь, зависит от содержания в сталях и чугунах углерода и состоит из следующих составляющих железа (феррит, аустенит), графита и цемента.

Железо – металл переходного класса с температурой плавления $t_{пл}=1539^{\circ}\text{C}$. Железо технической чистоты характеризуется следующими значениями показателей механических свойств: твердость – 49 НВ, $\sigma_B=170...210$ МПа, $\sigma_T=120$ МПа, $\delta=50\%$, $\psi=80\%$.

В твердом состоянии железо может находиться в двух модификациях. Полиморфные превращения в железе происходят при температурах 911°C и 1392°C . При температуре ниже 911°C существует α -Fe с объемно-центрированной кубической (ОЦК) кристаллической решеткой. В интервале температур от 911 до 1392°C устойчивой формой является γ -Fe с границентрированной кубической (ГЦК) кристаллической решеткой. Выше 1392°C железо имеет ОЦК-решетку и называется δ -Fe или высокотемпературное α -Fe. Высокотемпературная модификация α -Fe не является новой аллотропической формой. При температуре

ниже 768°C (768°C – точка Кюри для железа) железо ферромагнитно, а выше – парамагнитно.

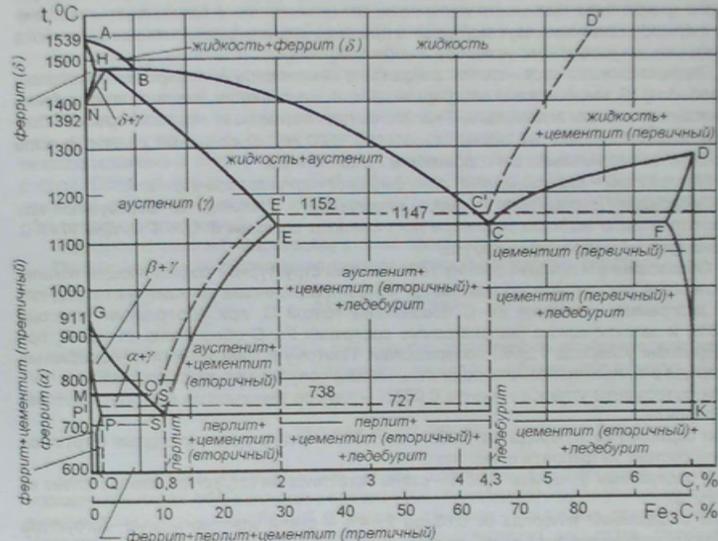


Рис. 1.1. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов (Fe-C)

Феррит – твердый раствор внедрения углерода в α -Fe. Максимальная растворимость углерода в феррите – около 0,008% при 20°C и 0,03% при 727°C . Феррит имеет ОЦК-решетку, магнитен, весьма пластичен. При высокой температуре (выше аустенитной области на диаграмме Fe-C) существует ещё одна фаза с ОЦК-решеткой, получившая название δ -феррит. Твёрдость феррита при нормальных условиях (н.у.) – 80...100 НВ.

Аустенит – твердый раствор внедрения углерода в γ -Fe. Максимальная растворимость углерода в аустените – около 2,14% (при 1147°C). Аустенит имеет ГЦК-решетку, не магнитен, пластичен, занимает объем, меньший чем феррит. Твёрдость аустенита при н.у. – 180...200 НВ. При растворении в аустените других химических элементов могут изменяться свойства и температурные границы его существования.

Графит (углерод) – неметалл. Условная температура плавления углерода – около 4600°C , плотность – 2230 кг/м^3 . В сплавах железа с углеродом углерод находится в состоянии твердого раствора с железом в виде химического соединения (цемента) – Fe_3C , а также в свободном состоянии в виде графита (в графитизированных сталях и графитизированных чугунах).

Цементит (Fe_3C) – химическое соединение железа с углеродом (карбид железа), содержащее 6,67% углерода. Цементит имеет высокую твердость (более 800 НВ), но чрезвычайно низкую, близкую к нулю, пластичность. Цементит спо-

способ образовать твердые растворы замещения. Атомы углерода могут замещаться атомами неметаллов: азотом, вольфрамом, атомы железа – металлами марганцем, хромом, вольфрамом и др. Такой твердый раствор на базе реламента цемента называют легированным цементом. Цемент – соединенный термодинамически неустойчивое и при определенных условиях распадается с образованием свободного углерода в виде графита.

Перлит (звектоид) – смесь феррита и цемента (в легированных сталях – карбидов). В зависимости от формы частиц цемента, перлит может быть пластинчатым или зернистым. Твердость пластинчатого перлита средней дисперсности ~200..260 НВ, зернистого ~160..200 НВ. Дисперсные разновидности перлита иногда называют сорбитом и трооститом.

Мартенсит – пересыщенный твердый раствор углерода в α -Fe. Ледебурит (звектика) – смесь аустенита и цемента. Образуется при кристаллизации жидкого раствора постоянного состава с 4,26% С, при 1147°С. Очень хрупок, твердость ~800 НВ.

Образование и доминирование той или иной структурной составляющей в железоуглеродистых сплавах определяется концентрационными точками звектоидного (на диаграмме состояния Fe–C обозначена точкой S, при содержании углерода 0,83%) и звектического (на диаграмме состояния Fe–C обозначена точкой C, при содержании углерода 4,26%) превращений. Поэтому в зависимости от содержания углерода в железе железоуглеродистые сплавы получили следующие названия:

- при содержании углерода менее 0,008% – железо техническое (структура состоит из феррита);
 - при содержании углерода от 0,008% до 0,83% – стали дозвектоидные (структура стали состоит из феррита и перлита);
 - при содержании углерода 0,83% – сталь звектоидная (структура стали состоит из перлита);
 - при содержании углерода от 0,83 до 2,14% – стали зазвектоидные (структура стали состоит из перлита и карбидов);
 - при содержании углерода от 2,14 до 4,26 – чугуны дозвектические;
 - при содержании углерода 4,26% – чугун звектический;
 - при содержании углерода от 4,26 до 6,67% – чугуны зазвектические.
- Стали классифицируют по химическому составу, структуре, назначению (служебным свойствам) и способу выплавки.

- Согласно ГОСТ 977-88, для изготовления отливок предусмотрены стали:
- конструктивные нелегированные;
 - конструктивные легированные;
 - легированные со специальными свойствами
- По степени легирования стали:
- нелегированные (углеродистые);
 - низколегированные стали (суммарное содержание легирующих элементов в составе стали – до 2,5%);
 - среднелегированные стали (суммарное содержание легирующих элементов в составе стали – 2,5..10%);
 - высоколегированные стали (суммарное содержание легирующих элементов в составе стали – более 10%).

По структуре легированные стали со специальными свойствами делят на классы: ферритный, мартенситно-ферритный, мартенситный, аустенитный и аустенитно-ферритный.

По назначению стали делят на конструкционные и стали со специальными свойствами (химическими, физическими). К числу конструкционных относят стали угле-

родистые и низколегированные, основными характеристиками которых являются показатели их механических свойств при обычной (комнатной) температуре. Стали со специальными свойствами, помимо механических свойств, в зависимости от назначения, характеризуются повышенной жаропрочностью, жаростойкостью, износостойкостью, коррозионной и кавитационной стойкостью и другими свойствами.

По способу выплавки стали классифицируют в зависимости от химических свойств используемой футеровки плавильного агрегата, в котором проводили выплавку стали – кислой, амфотерной (нейтральной) или основной.

В цехах литья по выплавляемым моделям, как правило, стали плавят в индукционных печах со всеми видами футеровок. Углеродистые и значительную часть низколегированных сталей выплавляют преимущественно в печах с кислой футеровкой. Среднелегированные и высоколегированные стали выплавляют в печах с основной футеровкой, значительно реже выплавку данных сталей проводят в печах с амфотерной футеровкой.

Маркировка сталей. Маркировка сталей проводят в соответствии с ГОСТ 977-88. Пример условного обозначения конструкционной (углеродистой) стали:

25Л ГОСТ 977-88

Для отливок, предназначенных для изделий, подлежащих приёмке представителем заказчика, конструкционную (углеродистую) сталь обозначают следующим образом:

25Л К20 ГОСТ 977-88

Конструкционные (углеродистые) стали, содержащие углерода 0,12..0,60%, маркируют числом, обозначающим среднее (по массе) содержание углерода в стали в сотых долях процента и буквой Л. Буква Л означает, что данная сталь литейная. Например, обозначение марки стали 25Л свидетельствует, что сталь литейная и содержит около 0,25% углерода.

Индексы "К" или "КТ" являются условными обозначениями категории прочности, а следующее за ними число означает величину требуемого предела текучести. Индекс "К" присваивают стали, находящейся в отожженном, нормализованном или отпущенном состоянии, индекс "КТ" присваивают стали после закалки и отпуска.

В маркировке легированной стали, помимо указания в ней содержания углерода, используют буквенные обозначения легирующих элементов, входящих в её состав. Эти буквы в сочетании с цифрами и являются обозначением марки стали.

Пример условного обозначения легированной стали:

23ХГ2МФЛ ГОСТ 977-88

Для отливок, предназначенных для изделий, подлежащих приёмке представителем заказчика, легированную сталь обозначают следующим образом:

23ХГ2МФЛ КТ ГОСТ 977-88

Содержание легирующего элемента в стали, если оно превышает 1...1,5% (по массе), в марке указывают цифрой (массовая доля легирующего элемента в процентах), стоящей после соответствующей буквы.

Если за буквой цифра отсутствует, то содержание данного легирующего элемента составляет около 1%. В этом отношении исключение сделано лишь для неко-

торых элементов (V, Ti, Mo, Nb, Zr, В, N и т.п.), присутствие которых, даже в тысячных долях процента, оказывает существенное влияние на свойства стали. Такие химические элементы используют для микролегирования сталей.

Если в начале марки стали цифра отсутствует, то это означает, что количество углерода в стали составляет 1% и выше. Для конструкционных сталей две цифры впереди марки указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Для инструментальных сталей одна цифра в начале марки означает среднее содержание углерода в десятых долях процента.

В маркировке сталей каждый легирующий химический элемент обозначают соответствующей буквой:

А – азот,	Х – хром,	Н – никель,	К – кобальт,	М – молибден,
Г – марганец,	Д – медь,	Б – ниобий,	Ц – цирконий,	С – кремний,
П – фосфор,	В – вольфрам,	Т – титан,	Ф – ванадий,	Ю – алюминий,
Р – бор,	Ч – редкоземельные металлы (РЗМ).			

Например, если для изготовления отливки используют сталь марки 08Х14Н7МЛ, то это означает, что сталь литейная и содержит около 0,08% углерода, 14% хрома, 7% никеля и молибдена около (не более) 1%.

Быстрорежущие стали обозначают буквой Р, после которой следует цифра, указывающая содержание вольфрама в стали, в % (по массе). Например: Р9, Р18 и т.п. В некоторых марках быстрорежущих сталей, помимо вольфрама, указывают содержание молибдена и ванадия. Например: сталь Р6М5Л (85Х4М5Ф2В6Л) или Р6М4Ф2Л (90Х4М4Ф2В6Л).

Опытные марки сталей, не вошедшие в ГОСТ 977-88, обозначают буквами ЭИ, ЭП, ДИ, ВЛ и определённым номером.

Стальные отливки, в зависимости от назначения и предъявляемых к ним требований, согласно ГОСТ 977-88 делят на три группы, характеристики которых приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Характеристики групп отливок

Группа отливок	Назначение	Характеристика отливок	Перечень контролируемых показателей качества отливок
1	Отливки общего назначения	Отливки для деталей, конфигурация и размеры которых определяются только конструктивными и технологическими соображениями	Внешний вид, размеры, химический состав
2	Отливки ответственного назначения	Отливки для деталей, рассчитываемых на прочность и работающих при статических нагрузках	Внешний вид, размеры, химический состав, механические свойства (предел текучести или временное сопротивление и относительное удлинение)
3	Отливки особо ответственного назначения	Отливки для деталей, рассчитываемых на прочность и работающих при циклических и динамических нагрузках	Внешний вид, размеры, химический состав, механические свойства (предел текучести или временное сопротивление, относительное удлинение и ударная вязкость)

Помимо перечня контролируемых показателей качества, приведенного в табл. 1.2, в отдельных случаях у отливок дополнительно могут контролировать уровень

показателей, не предусмотренных в табл. 1.2. К числу таких показателей относятся плотность, герметичность, шероховатость поверхности, магнитные свойства, фазовый состав, жаростойкость, стойкость против межкристаллитной коррозии и другие специальные характеристики, в том числе микро- и макроструктура отливок. В случае необходимости контроля данных показателей, их наличие и соответствующим образом указывают в соответствующей конструкторской документации (КД) или нормативно-технической документации (НТД).

Для отливок группы 3, предназначенных для изделий, подлежащих приемке представителем заказчика, работающих при пониженных температурах и подвергнутой вязкости стали определяют при температуре минус 50°С. При этом нормы ударной вязкости указывают в КД и (или) НТД на конкретную продукцию.

Возможность установления, в качестве нормируемого показателя, относительного сужения вместо относительного удлинения, а также возможность увеличения норм прочности при соответствующем снижении норм пластичности и вязкости, называют в КД и (или) НТД. Нормы, возможность снижения уровня механических свойств, определяемых на образцах, вырезанных из отливок, указывают в КД.

Стальные отливки обозначают в соответствии с их делением на группы. Например, для отливок первой группы:

Отливки 1-й группы ГОСТ 977-88

Компоненты, входящие в состав стали, условно делят на полезные и вредные. Полезные компоненты делят на технологические (компоненты, присутствующие в составе любой стали) и легирующие (компоненты, присутствующие в составе отдельных марок сталей).

К числу технологических компонентов сталей относят Mn и Si.

Содержание Mn в любой марке стали находится в пределах от 0,3 до 0,9% (по массе), за исключением сталей, где Mn является легирующим элементом. Указанное количество марганца в стали в значительной степени уменьшает её склонность к "красноломкости", вызванной естественным присутствием в ней определённого количества серы.

Содержание кремния в сталях, как правило, находится в пределах от 0,20 до 0,52%, что предупреждает образование в отливках значительной газоусадочной пористости. С этой же целью, помимо Si, в сталь вводят Al в количестве 0,02... 0,05%.

Для придания сталям специальных свойств в них вводят легирующие элементы (Ni, Cr, Mo, W, Co и т. д.). Сталь, содержащая значительное количество легирующих элементов, называют легированной (низколегированной, среднелегированной или высоколегированной). Из технологических компонентов стали, легирующими элементами могут быть и Si (при содержании более 0,6%), и Mn (при содержании более 1%), а также Al и Ti.

В стали, помимо вышеуказанных химических элементов, как правило, в том или ином количестве, присутствуют нежелательные элементы: азот, кислород и сера. Данные химические элементы образуют с марганцем, кремнием и алюминием различные химические соединения (оксиды, нитриды, сульфиды и т.п.), представляющие собой неметаллические включения (Н.В.) в стали.

Размер, форма, количество и равномерность распределения Н.В. в структуре стали, во многом, предопределяют её свойства (механические, технологические и др.). Поэтому для получения высокого уровня свойств металла в отливке стремятся получить металл с минимально возможным количеством Н.В., Н.В. с глобулярной формой, с равномерным распределением Н.В. по телу отливки (в теле зёрен, а не

по их границам). Для этой цели, помимо алюминия, в сталь дополнительно вводят Ti, Ca, Zr, La, Zr и т.п. в количестве 0,05... 0,10%. Поскольку вышеуказанные элементы вводят не всегда и не во все стали, то эти элементы называют микролегирующими.

Помимо серы, азота и кислорода к числу вредных примесей стали относят Р, As, Sn, Pb, Sb, H. В ряде случаев азот вводят в сталь намеренно, с целью повышения её прочности или взамен никеля, для удешевления стали. В таких случаях азот является одним из легирующих элементов стали, а его наличие как легирующего элемента отражают в марке стали.

Нелегированные (углеродистые) конструкционные стали. Углеродистые литейные стали разделяют на конструкционные (содержание углерода до 0,6%) и инструментальные (содержание углерода от 0,6 до 1,3%).

Конструкционные углеродистые стали разделяют на низкоуглеродистые стали (содержание углерода до 0,2%) и среднеуглеродистые стали (содержание углерода от 0,25 до 0,6%).

Краткая характеристика сталей и преимущественная область применения литых деталей из нелегированных конструкционных сталей приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Характеристика сталей и область применения литых деталей из нелегированных (углеродистых) конструкционных сталей

Марка стали	Характеристика стали	Область применения
15Л	Низкая коррозионная стойкость, удовлетворительная жидкотекучесть, не склонна к образованию горячих трещин в отливках, хорошо сваривается (после сварки необходима термообработка – отжиг).	Несложные по конфигурации отливки сварно-литых конструкций, массивные отливки типа крышек, патрубков, фланцев и др., работающие под давлением при температурах от -40°C до +450°C. Изготовление цементуемых изделий (измерительный инструмент, детали машин), работающих на износ и т.д.
20Л	То же, но склонность к образованию трещин значительно ниже, чем у стали 15Л.	
25Л* 30Л*	То же	Сравнительно мало нагруженные детали машин и агрегатов, турбин, корпуса подшипников и др.
35Л*	Низкая коррозионная стойкость, удовлетворительная жидкотекучесть, не склонна к образованию трещин в отливках, хорошо сваривается. Пониженная теплопроводность стали приводит к формированию повышенных напряжений в отливках и, как следствие, их короблению.	Детали общемашиностроительного назначения
40Л*	То же	
45Л*	Низкая коррозионная стойкость и прокаливаемость. Хорошая жидкотекучесть. Не склонна к образованию трещин в отливках, хорошо сваривается.	Детали, от которых требуется повышенная прочность (валы, шестерни, шатуны, опоры, кронштейны и т.д.).
50Л	То же. Склонна к возникновению значительных внутренних напряжений в отливках.	

Примечание. * – закалка и отпуску могут быть подвергнуты отливки небольших размеров и простой конфигурации.

В табл.1.4 приведен химический состав углеродистых сталей, а в табл. 1.5 и табл. 1.6 соответственно приведены режимы термической обработки (термообработки) и механические свойства данных сталей после термической обработки.

Таблица 1.4
Содержание основных химических элементов в нелегированных конструкционных сталях (ГОСТ 977-88)

Марка стали	Массовая доля элементов, % (остальное – Fe)		
	C	Mn	Si
15Л	0,12–0,20	0,45–0,90	0,2–0,52
20Л	0,17–0,25		
25Л	0,22–0,30		
30Л	0,27–0,35		
35Л	0,32–0,40		
40Л	0,37–0,45		
45Л	0,42–0,50		
50Л	0,47–0,55		

Таблица 1.5

Режимы термической обработки нелегированных конструкционных сталей

Марка стали	Режимы термической обработки			
	Нормализация и отпуск		Закалка и отпуск	
	нормализация	отпуск	закалка	отпуск
	Температура, °C			
15Л	910–930	670–690	–	–
20Л	880–900	630–650	–	–
25Л	880–900	610–630	870–890	610–630
30Л	880–900	610–630	860–880	610–630
35Л	860–880	600–630	860–880	600–630
40Л	860–880	600–630	860–880	600–630
45Л	860–880	600–630	860–880	600–630
50Л	860–880	600–630	860–880	600–630

Таблица 1.6

Механические свойства нелегированных конструкционных сталей

Марка стали	Категория прочности	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	φ , %	КСУ, кДж/м ²	Категория прочности							
							σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	φ , %	КСУ, кДж/м ²			
												не менее		
нормализация или нормализация и отпуск							закалка и отпуск							
15Л	K20	392	196	24	35	491	–	–	–	–	–	–	–	–
20Л	K20	412	216	22	35	491	–	–	–	–	–	–	–	–
25Л	K20	441	235	19	30	392	КТ30	491	294	22	33	343	–	–
30Л	K25	471	255	17	30	343	КТ30	491	294	17	30	343	–	–
35Л	K25	491	275	15	25	343	КТ35	540	343	16	20	294	–	–
40Л	K30	520	294	14	25	294	КТ35	540	343	14	20	294	–	–
45Л	K30	540	314	12	20	294	КТ40	589	392	10	20	294	–	–
50Л	K30	569	334	11	20	245	КТ40	736	392	14	20	294	–	–

Примечание. σ_B – временное сопротивление; σ_T – предел текучести; δ – относительное удлинение; φ – относительное сужение; КСУ – ударная вязкость.

Как следует из данных, приведенных в табл. 1.4, основным компонентом углеродистых сталей, определяющим их свойства, является углерод, с увеличением содержания которого повышается твердость и прочность стали, а её пластические свойства – понижаются. Данная закономерность обусловлена увеличением доли перлита в структуре стали, с увеличением в ней содержания углерода.

В углеродистых сталях углерод предопределяет не только механические и технологические свойства сталей, но и их теплофизические свойства, о чём свидетельствуют данные, приведенные в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Значения некоторых теплофизических свойств углеродистых сталей

Содержание углерода в стали, %	Температура, °С		Δt_{L_s} , °С	c_1 , Дж/(кг·К)	c_1^1 , Дж/(кг·К)	L, Дж/кг	ρ_1^1 , кг/м ³	
	t_L	t_s					t_L	$t_L + 100^\circ\text{C}$
0,00	1539	1539	0	695	922	274000	7058	6990
0,12	1520	1485	35	753	920	264000	7066	6996
0,25	1512	1470	42	753	920	264000	7064	6995
0,35	1505	1460	45	753	920	259000	7132	7065
0,60	1485	1430	55	753	920	255000	7069	6995
0,80	1460	1370	90	753	920	251000	7080	7003

Примечание. t_L и t_s – температура ликвидус и солидус, соответственно; Δt_{L_s} – температурный интервал кристаллизации; c_1 – удельная теплоёмкость при 20°C; c_1^1 – удельная теплоёмкость жидкой стали; L – удельная теплота кристаллизации; ρ_1^1 – плотность жидкой стали при температуре ликвидус (t_L) и температуре перегрева расплава стали на 100°C выше температуры ликвидус ($t_L + 100$).

Присутствующий в стали марганец, в основном, выполняет функцию раскислителя и десульфуратора, что повышает её трещиностойчивость. Кремний, в основном, вводят в сталь как раскислитель. Ограничение верхнего предела содержания кремния в стали объясняется его заметным влиянием на снижение её пластичности. Тем не менее, содержание марганца и кремния в углеродистых сталях является фактативным, поэтому их незначительное отклонение от пределов, указанных в ГОСТ 977-88, в ряде случаев не является браковочным признаком стали по химическому составу.

Фосфор и сера являются вредными примесями в сталях, в связи с чем их содержание строго ограничено. Предельнодопустимое содержание серы и фосфора в стали в зависимости от группы отливки и способа выплавки стали (типа футеровки плавильной печи), приведено табл. 1.8.

Содержание фосфора и серы в углеродистых конструкционных сталях

Таблица 1.8

Группа отливки	S, %, не более		P, %, не более	
	Способ выплавки стали			
	основной	кислый	основной	кислый
I	0,040	0,060	0,040	0,060
II	0,035	0,060	0,035	0,060
III	0,030	0,050	0,030	0,050

С увеличением содержания серы в стали увеличивается количество Н.В. в отливках, что, за исключением предела текучести, понижает механические свойства трещин в отливках.

Фосфор снижает пластические свойства углеродистой стали, при некотором повышении её прочности и предела текучести. Кроме того, фосфор существенно повышает вероятность образования трещин в литых деталях, работающих при низких температурах.

Содержание хрома, никеля и меди в конструкционных углеродистых сталях не должно превышать 0,3%, что объясняется, как неоправданным удорожением стали, так и существенным негативным влиянием данных элементов на её механические свойства.

Литейные и технологические свойства углеродистых сталей, в основном, зависят от содержания в них углерода и Н.В. С увеличением содержания Н.В. жидкотекучесть стали, её трещиностойчивость и механические свойства понижаются.

Свободная линейная усадка стали, практически, не зависит от содержания в ней Н.В. и предопределяется содержанием углерода. С увеличением в стали содержания углерода до 0,25% её свободная линейная усадка понижается и при больших содержаниях углерода изменяется незначительно.

Условно-истинная жидкотекучесть стали постепенно уменьшается с увеличением содержания углерода до 0,4% и, при дальнейшем увеличении содержания углерода практически не изменяется.

Зависимость изменения практической жидкотекучести от содержания углерода в стали носит сложный характер. С увеличением содержания углерода до 0,1% практическая жидкотекучесть стали уменьшается. При содержании углерода от 0,1 до 0,6% практическая жидкотекучесть стали существенно увеличивается и при содержании в ней углерода от 0,6 до 0,8% и более – существенно не изменяется.

Рассматривая нелегированные конструкционные стали с точки зрения их склонности к образованию горячих трещин в отливках, следует отметить, что максимальным значением условной горячеломкости обладают низкоуглеродистые стали с содержанием углерода 0,16...0,20%. В интервале содержания углерода от 0,25 до 0,45% горячеломкость сталей понижается и при содержании углерода более 0,45...0,50% плавно увеличивается.

Помимо углерода на трещиностойчивость стали заметное влияние оказывает содержание в ней марганца и серы. При всех прочих равных условиях, наибольшей трещиностойчивостью обладает сталь, содержащая марганец в количестве, рассчитанном по формуле [170], %:

$$Mn = 0,5 + 12 \cdot S + \frac{0,86}{C}, \quad (1.1)$$

где содержание серы и углерода указано в % (по массе).

Все стальные отливки подвергают термической обработке. Наиболее распространённым видом термической обработки отливок из конструкционных нелегированных (углеродистых) сталей является нормализация с отпуском. Для повышения временного сопротивления и предела текучести сталей отливки подвергают закалке с отпуском. Как правило, закалке и отпуску подвергают небольшие отливки простой конфигурации.

Инструментальные (высокоуглеродистые) стали. К инструментальным относят высокоуглеродистые стали, содержащие от 0,6 до 1,4% С.

Маркировка инструментальных сталей отлична от маркировки конструктивных сталей. В частности, буквы и цифры в обозначении инструментальной марки стали означают: У – сталь углеродистая, нелегированная (высокоуглеродистой) марки стали означают: У – сталь углеродистая, ментальной (высокоуглеродистой) марки стали означают: У – сталь углеродистая, цифра, следующая за буквой У, означает среднее массовое содержание углерода в процентах, буква Г – повышенное содержание марганца в стали. В мар-десятых долей процента, буква Г – повышенное содержание марганца в стали. Инструментальные стали делят на качественные и высококачественные. В мар-десятых долей процента, буква Г – повышенное содержание марганца в стали. Инструментальные стали обозначают буквой А. Химический состав угле-родистых инструментальных сталей приведен в табл. 1.9.

Таблица 1.9

Марка стали	Массовая доля элементов, % (остальное – Fe)					Марка стали	Массовая доля элементов, % (остальное – Fe)				
	C	Mn	Si	S	P		C	Mn	Si	S	P
У7	0,65–0,74	0,17–0,33	0,17–0,33	0,028	0,030	У7А	0,65–0,74	0,17–0,28	0,17–0,33	0,018	0,025
У8	0,75–0,84					У8А	0,75–0,84				
У8Г	0,80–0,90	0,17–0,33	0,17–0,33	0,028	0,030	У8ГА	0,80–0,90	0,33–0,58	0,17–0,33	0,018	0,025
У9	0,85–0,94					У9А	0,85–0,94				
У10	0,95–1,04	0,17–0,33	0,17–0,33	0,028	0,030	У10А	0,95–1,04	0,17–0,28	0,17–0,33	0,018	0,025
У11	1,05–1,14					У11А	1,05–1,14				
У12	1,15–1,24	0,17–0,33	0,17–0,33	0,028	0,030	У12А	1,15–1,24	0,17–0,28	0,17–0,33	0,018	0,025
У13	1,25–1,35					У13А	1,25–1,35				

Углеродистые инструментальные стали обладают высокими литейными и технологическими свойствами, твердостью (до HRC 65 в закаленном состоянии). В связи с высокой твердостью отливки из высокоуглеродистых сталей плохо поддаются механической обработке.

Стали У6, У7 и У8, в основном, используют для изготовления ударно-режущего слесарно-монтажного инструмента. Стали с высоким содержанием углерода (У10...У13) используют для производства самого разнообразного режущего и измерительного инструмента.

Высокоуглеродистые инструментальные стали имеют относительно хорошую жидкотекучесть, малую склонность к образованию горячих трещин, но склонны к образованию значительных напряжений в отливках. Литники и прибыли от отливок из высокоуглеродистой стали нельзя отделять при помощи ацетилено-кислородной резки в связи с возможностью образования трещин в отливках. В процессе термообработки нагрев отливок следует по той же причине проводить с большой осторожностью. Отливки из высокоуглеродистой стали, содержащей около 0,6% углерода, подвергают только отжигу, без закалки. Отливки из сталей, содержащих углерода более 1% и работающие на истирание, можно использовать без термообработки.

Легированные стали. Легированной, как было отмечено выше, называют сталь, которая, помимо "традиционных" примесей и элементов, дополнительно содержит легирующие элементы (Cr, Ni, Mo, W, V, Al, B, Ti и др.), а также Mn и Si в количествах, превышающих 1% (по массе).

Легирование стали проводят с целью придания ей специальных свойств (коррозионной стойкости, жаропрочности, жаростойкости, магнитных свойств, кавитационной стойкости, снижения порога хладноломкости, кислотостойкости и т.п.), повышения технологичности (жидкотекучести, трещиностойчивости, прокаливаемости и т.п.) и увеличения показателей механических свойств. В связи с этим, помимо классификации по степени легирования, легированные стали классифицируют и по на-

значению, и по структуре. По назначению из числа легированных сталей выделяют зико-химическими свойствами.

Стали конструктивные легированные. Стали данной группы используют для изготовления отливок, работающих в условиях износа в сочетании с ударными нагрузками, а также фасонных отливок ответственного назначения и измерительного инструмента. Химический состав легированных сталей приведен в табл. 1.10.

Таблица 1.10

Марка стали	Массовая доля элементов, % (остальное – Fe)								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Прочие
20ГЛ	0,15–0,25	1,2–1,6	0,2–0,40	0,04	0,04	<0,3	<0,3	<0,3	–
35ГЛ	0,30–0,40	1,2–1,6	0,2–0,40	0,04	0,04	<0,3	<0,3	<0,3	–
20ГСЛ	0,16–0,22	1,0–1,3	0,6–0,80	0,03	0,03	–	–	–	–
30ГСЛ	0,25–0,35	1,1–1,4	0,6–0,80	0,04	0,04	<0,3	<0,3	<0,3	–
20Г1ФЛ	0,16–0,25	0,9–1,4	0,2–0,50	0,05	0,05	<0,3	<0,3	<0,3	–
20ФЛ	0,14–0,25	0,7–1,2	0,2–0,52	0,05	0,05	<0,3	<0,3	<0,3	0,06–0,12 V, до 0,05 Ti
30ХГСФЛ	0,25–0,36	1,0–1,5	0,4–0,60	0,05	0,05	0,3–0,5	<0,3	<0,3	0,06–0,12 V
45ФЛ	0,42–0,50	0,4–0,9	0,2–0,52	0,05	0,05	До 0,3	<0,3	<0,3	0,05–0,10 V, до 0,03% Ti
32Х06Л	0,25–0,35	0,4–0,9	0,2–0,40	0,05	0,05	0,5–0,8	<0,3	<0,3	–
40ХЛ	0,35–0,45	0,4–0,9	0,2–0,40	0,04	0,04	0,8–1,1	<0,3	<0,3	–
20ХМЛ	0,15–0,25	0,4–0,9	0,2–0,42	0,04	0,04	0,4–0,7	–	–	0,4–0,6 Mo
20ХМФЛ	0,18–0,25	0,6–0,9	0,2–0,40	0,025	0,025	0,9–1,2	–	–	0,5–0,7 Mo, 0,2–0,3 V
20ГНМФЛ	0,14–0,22	0,7–1,2	0,2–0,40	0,03	0,03	<0,3	0,7–1,0	–	0,15–0,25 Mo, 0,06–0,12 V
35ХМЛ	0,30–0,40	0,4–0,9	0,2–0,40	0,04	0,04	0,8–1,1	<0,3	<0,3	0,2–0,3 Mo
30ХНМЛ	0,25–0,35	0,4–0,9	0,2–0,40	0,04	0,04	1,3–1,6	1,3–1,6	<0,3	0,2–0,3 Mo
35ХГСЛ	0,30–0,40	1,0–1,3	0,6–0,80	0,04	0,04	0,6–0,9	<0,33	<0,3	–
35НГМЛ	0,32–0,42	0,8–1,2	0,2–0,40	0,04	0,04	<0,3	0,8–1,2	<0,3	0,15–0,25 Mo
20ДХЛ	0,15–0,25	0,5–0,8	0,2–0,40	0,04	0,04	0,8–1,1	<0,3	1,4–1,6	–
08ГДнФЛ	<0,10	0,6–1,0	0,16–0,4	0,035	0,035	<0,3	1,15–1,56	0,8–1,2	По расчёту + 0,01 V
13ХнДФЛ	<0,16	0,4–0,9	0,2–0,4	0,03	0,03	0,15–0,4	1,2–1,6	0,65–0,9	0,06–0,12 V, 0,04–0,1 Ti
12Дн2ФЛ	0,08–0,16	0,4–0,9	0,2–0,4	0,035	0,035	<0,3	1,8–2,2	1,2–1,5	0,08–0,15 V
12ДХн1МФЛ	0,10–0,18	0,3–0,56	0,2–0,4	0,03	0,03	1,2–1,7	1,4–1,8	0,4–0,5	0,2–0,3 Mo, 0,08–0,15 V
23ХГС2МФЛ	0,18–0,24	0,5–0,8	1,8–2,0	0,025	0,025	0,6–0,9	<0,3	<0,3	0,25–0,3 Mo, 0,1–0,15 V
12Х7Г3СЛ	0,1–0,16	3,0–3,5	0,8–1,2	0,02	0,02	7–7,5	<0,3	–	–
25Х2ГНМФЛ	0,22–0,30	0,7–1,1	0,3–0,7	0,025	0,025	1,4–2,0	0,3–0,9	–	0,2–0,5 Mo, 0,04–0,3 V
27Х5ГСМЛ	0,24–0,28	0,9–1,2	0,9–1,2	0,02	0,02	5,0–5,5	<0,3	–	0,55–0,6 Mo
30Х3С3ГМЛ	0,29–0,33	0,7–1,2	2,8–3,2	0,02	0,02	2,8–3,2	<0,3	–	0,5–0,6 Mo
03Н12Х5М3ТЛ	0,01–0,04	<0,2	<0,2	0,015	0,015	4,5–5,0	12–12,5	–	2,5–3 Mo, 0,7–0,9 Ti
03Н12Х5М3ТЮЛ	0,01–0,04	<0,2	<0,2	0,015	0,015	4,5–5,0	12–12,5	–	2,5–3 Mo, 0,7–0,9 Ti, 0,25–0,45 Al

Все отливки из легированных марок сталей проходят соответствующую термическую обработку, которая обеспечивает сталям определённый уровень механических, технологических и эксплуатационных свойств, стабилизирует размерную точность отливок, снижает величину внутренних напряжений и т.п.

Механические свойства некоторых легированных сталей после их термообработки приведены в табл. 1.11.

Таблица 1.11
Механические свойства конструкционных легированных сталей (ГОСТ 977-88)

Марка стали	Категория прочности	не менее					Категория прочности	не менее				
		σв, МПа	σт, МПа	δ, %	φ, %	КСУ, кДж/м ²		σв, МПа	σт, МПа	δ, %	φ, %	КСУ, кДж/м ²
20ГЛ	К25	540	275	18	25	491	КТ30	530	334	14	25	384
35ГЛ	К30	540	294	12	20	294	КТ35	589	343	14	30	491
20ГСЛ	К30	540	294	18	30	294	—	—	—	—	—	—
30ГСЛ	К35	589	343	14	25	294	КТ40	638	392	14	30	491
20Г1ФЛ	К30	510	314	17	25	491	—	—	—	—	—	—
20ФЛ	К30	491	294	18	35	491	—	—	—	—	—	—
30ХГСФЛ	К40	589	392	15	25	343	КТ60	785	589	14	25	441
45ФЛ	К40	589	392	12	20	294	КТ50	687	491	12	20	294
32Х06Л	—	—	—	—	—	—	КТ45	638	441	10	20	491
40ХЛ	—	—	—	—	—	—	КТ50	638	491	12	25	392
20ХМЛ	К25	441	245	18	30	294	—	—	—	—	—	—
20ХМФЛ	К25	491	275	16	35	294	—	—	—	—	—	—
20ГНМФЛ	К50	589	491	15	33	491	КТ60	687	589	14	30	589
35ХМЛ	К40	589	392	12	20	294	КТ55	687	540	12	25	392
30ХНМЛ	К55	687	540	12	20	294	КТ65	785	638	10	20	392
35ХГСЛ	К35	589	343	14	25	294	КТ60	785	589	10	20	392
35НГМЛ	—	—	—	—	—	—	КТ60	736	589	12	25	392
20ДЛ	К40	491	392	12	30	294	КТ55	638	540	12	30	392
08ГДНФЛ	К35	441	343	18	30	491	—	—	—	—	—	—
13ХНДФЛ	К40	491	392	18	30	491	—	—	—	—	—	—
12ДН2ФЛ	К55	638	540	12	20	294	КТ65	785	638	12	25	392
12ДХН1МФЛ	К65	785	638	12	20	294	КТ75	981	735	10	20	294
23ХГС2МФЛ	—	—	—	—	—	—	КТ110	1275	1079	6	24	392
12ХГТЗСЛ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
25Х2ГНМФЛ ¹	—	—	—	—	—	—	КТ110	1324	1079	9	40	589
25Х2ГНМФЛ ²	—	—	—	—	—	—	КТ50	638	491	12	30	589
27Х5ГСМЛ	—	—	—	—	—	—	КТ110	1275	1079	5	25	392
30Х3СЗГМЛ	—	—	—	—	—	—	КТ120	1472	1177	5	20	392
03Н12Х5МЗТЛ	—	—	—	—	—	—	КТ150	1766	1472	4	15	196
03Н12Х5МЗТЮЛ	—	—	—	—	—	—	КТ130	1324	1225	8	45	491
03Н12Х5МЗТЮЛ	—	—	—	—	—	—	КТ145	1472	1422	8	35	294

Примечание. ^{1,2} — характеристики получены при режиме термической обработки, указанном в табл. 1.12.

Отливки из конструкционных легированных сталей подвергают термической обработке, которая включает либо нормализацию и отпуск, либо закалку и отпуск. Выделяется требованиями к литой детали, а именно – категорией её прочности.

Режимы термической обработки конструкционных легированных сталей приведены в табл. 1.12.

Таблица 1.12
Режимы термической обработки конструкционных легированных сталей

Марка стали	Режимы термической обработки			
	Нормализация и отпуск		Закалка и отпуск	
	нормализация	отпуск	закалка	отпуск
			Температура, °С	
20ГЛ	880-900	600-650	870-890	620-650
35ГЛ	880-900	600-650	850-860	600-650
20ГСЛ	870-890	570-600	—	—
30ГСЛ	870-890	570-600	—	—
20Г1ФЛ	930-970	600-650	920-950	570-650
20ФЛ	920-960	600-650	—	—
30ХГСФЛ	900-930	600-650	—	—
45ФЛ	880-920	600-650	900-920	630-670
32Х06Л	—	—	880-920	600-650
40ХЛ	—	—	890-910	620-660
20ХМЛ	880-890	600-650	850-870	600-650
20ХМФЛ	970-1000 и 960-980	710-740	—	—
20ГНМФЛ	910-930	600-650	—	—
35ХМЛ	860-880	600-650	910-930	640-660
30ХНМЛ	860-880	600-650	860-870	600-650
35ХГСЛ	870-890	570-600	860-870	600-650
35НГМЛ	—	—	870-880	630-670
20ДЛ	880-890	560-600	860-880	600-650
08ГДНФЛ	920-950 или 920-950	—	880-890	560-600
13ХНДФЛ	950-970 или 900-920	590-650	—	—
—	910-930	530-560	—	—
12ДН2ФЛ	910-930	530-560 или	—	—
—	Предварительная обработка	—	Окончательная обработка	—
—	940-950	—	890-910	560-600
12ДХН1МФЛ	940-960 или 890-910	—	—	—
—	Предварительная обработка	520-630	890-910	520-630
23ХГС2МФЛ	1000-1040	720-740	1000-1020	180-220
12ХГТЗСЛ	Предварительная обработка	—	Окончательная обработка	—
—	940-960	650-720	880-900	200-250
25Х2ГНМФЛ ¹	Предварительная обработка	—	Окончательная обработка	—
—	900-950	650-700	880-920	630-700
25Х2ГНМФЛ ²	Предварительная обработка	—	Окончательная обработка	—
—	900-950	660-680	900-950	260-300
27Х5ГСМЛ	Предварительная обработка	—	Окончательная обработка	—
—	970-990	700-720	980-1000	200-220
30Х3СЗГМЛ	Предварительная обработка	—	Окончательная обработка	—
—	970-990	700-720	980-1000	200-220

Примечание. ^{1,2} — режимы термообработки, обеспечивающие получение уровня механических свойств, указанного в табл. 1.11. Для стали 40ХФЛ допускается применять отпуск после нормализации. Для стали 23ХГС2МФЛ приведенные режимы предварительной термообработки можно заменить закалкой с отпуском, отжигом или отпуском. Для сталей 03Н12Х5МЗТЛ и 03Н12Х5МЗТЮЛ рекомендуется применять термообработку по следующему режиму: гомогенизация при температуре 1180...1200°С, закалка с 1000°С, старение при температуре 500°С.

В зависимости от содержания углерода, а также содержания и типа используемого легирующего элемента, стали характеризуются самыми различными свойствами. В частности, марганцовистые стали (20ГЛ, 35ГЛ, 30ГСЛ и др.), по сравнению с конструкционными нелегированными сталями, содержат большее количество Mn, что обеспечивает им значительно большую прочность и износостойкость при сохранении аналогичного уровня величины ударной вязкости. Оптимального соотношения прочности и пластичности марганцовистых сталей достигают после их нормализации при сорбитной структуре. По данным Ю.А. Нехендзи, этого можно достичь при следующих сочетаниях содержания углерода и марганца в стали:

%C	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24
%Mn	1,70...1,83	1,55...1,80	1,53...1,78	1,50...1,75	1,48...1,72	1,45...1,70

%C	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29
%Mn	1,43...1,68	1,40...1,65	1,37...1,62	1,35...1,60	1,33...1,43

С повышением содержания в марганцовистой стали углерода понижается её ударная вязкость, но увеличивается прочность, твёрдость и износостойкость.

Марганцовистые стали обладают сравнительно невысокой прокаливаемостью, чувствительны к перегреву и отпускной хрупкости при термообработке, хорошо свариваются. Свариваемость отливок улучшается с понижением содержания в сталях углерода и марганца. Коррозионные свойства сталей неудовлетворительны.

Практическая жидкотекучесть марганцовистых сталей несколько ниже, чем углеродистых, но непрерывно возрастает с увеличением содержания марганца. Для повышения жидкотекучести в сталь рекомендуется ввести по 0,15% Zr и Ce.

Повышенное (сверх 1,0...1,5%), по сравнению с углеродистыми сталями, содержание Mn понижает теплопроводность стали, что в сочетании с повышенной доперлитной усадкой отрицательно сказывается на её трещиностойчивости и склонности к короблению отливок. Сталь склонна к межкристаллической ликвации и образованию крупнокристаллической структуры в отливках, чувствительна к перегреву при термообработке.

Для повышения механических свойств, стали, дополнительно, легируют Ti, Si, B, Cr, Mo и др.

Хромистые стали (40ХЛ, 35ХМЛ и др.), при той же величине пластичности, что и у конструктивных нелегированных сталей с аналогичным содержанием углерода, имеют более высокую прочность и значительно лучшую прокаливаемость, склонны к отпускной хрупкости. Литейные свойства хромистых сталей практически такие же, как и литейные свойства конструктивных нелегированных сталей с аналогичным содержанием углерода. Хромистые стали склонны к образованию крупного зерна в отливках, что в сочетании с пониженной теплопроводностью нередко приводит к образованию трещин и короблению отливок. Для измельчения структурных составляющих металла отливок в сталь дополнительно вводят молибден.

Использование молибдена позволяет не только получать отливки с мелкозернистой структурой, но и улучшить литейные свойства хромистых сталей, избежать их отпускной хрупкости при термообработке. Для улучшения технологических и механических свойств хромистые стали также легируют W, Ti или V.

Комплексно легируемые стали 25ХГСЛ, 30ХГСЛ, 35ХГСЛ (хромансилы) обладают высокой прочностью и прокаливаемостью, хорошей жидкотекучестью, склонны к короблению и образованию трещин в отливках. Макроструктура сталей в отливках характеризуется крупнокристаллическим строением. Измельчения структуры сталей

и улучшения их технологических свойств достигается путём дополнительного ввода в сталь добавок 0,06...0,15% V, Mo или Ti. Свариваемость сталей – ограниченная. Хромистые стали 20ХМЛ, 20Х5ТЛ, 20Х8ВЛ благодаря сочетанию высоких механических свойств, жаростойкости до 450...600°C и коррозионной стойкости в нефте-рерабатывающих установках.

Хромоникелевые стали типа 40ХНЛ, 30ХНМЛ, 40ХНТЛ, 35ХН2ВЛ и др. обладают одним из лучших, среди конструкционных сталей, сочетанием уровней показателей механических свойств. Оптимальное сочетание уровней показателей прочности и пластичности достигают в хромоникелевой конструкционной стали при соотношении содержания в ней $\frac{Ni}{Cr} = \frac{1}{1,25}$ [1]. Наилучшим сочетанием уровней показателей ме-

ханических свойств, из данного ряда сталей, обладает сталь 30ХНМЛ.

Сталь 30ХНМЛ характеризуется хорошей прокаливаемостью и обрабатываемостью резанием. Наличие в стали 0,2...0,3% Mo резко снижает отпускную хрупкость стали, улучшает её механические свойства и обрабатываемость. Макроструктура стали в отливках характеризуется крупнокристаллическим строением. Для измельчения зерна и улучшения технологических свойств сталь дополнительно легируют Ti, W, V, Se или Zr. Литейные свойства стали 30ХНМЛ легируют ниже, чем у конструкционной нелегированной стали, сталь 30ХНМЛ несколько ниже. В отливках, с повышением температуры заливки с тем же содержанием углерода. В отливках, с повышением температуры заливки с тем же содержанием углерода, образованием горячих трещин и межкристаллитного камневидного излома, вызванного чрезмерным количеством азота, растворённого в стали, и использованием алюминия в качестве её раскислителя.

Для предотвращения образования камневидного излома ограничивают количество используемого для раскисления алюминия, заменив его другим химически активным элементом. Кроме того, во избежание появления камневидного излома в отливках, в процессе плавки расплав предохраняют от насыщения его азотом либо проводят диффузионный отжиг отливок. С этой же целью интенсифицируют процесс охлаждения отливки в форме, для чего заливку стали проводят в КО, не заформованные в опорный наполнитель.

Никелевые стали, в связи с высокой стоимостью никеля, применяют редко, в основном, для отливок, подвергающихся цементации (сталь с низким содержанием углерода). По сравнению с конструкционной нелегированной сталью никелевая низкоуглеродистая сталь обладает повышенной ударной вязкостью даже при низких температурах. С увеличением содержания углерода увеличивается прочность стали и понижается её пластичность. Практическая жидкотекучесть никелевой стали выше жидкотекучести конструкционной нелегированной стали с тем же содержанием углерода и возрастает с увеличением содержания никеля. Все никелевые стали характеризуются низкой трещиностойчивостью.

Медистые стали (20ДХЛ, 20ХГСНДМЛ, 08ГДНФЛ, 13ХНДФЛ и др.) при содержании меди более 0,3% склонны к дисперсионному твердению после закалки. Максимального развития эффект дисперсионного твердения достигает при содержании 1,5% Cu. Эффект дисперсионного твердения способствует повышению прочности, твёрдости и упругости сталей при некотором понижении вязкости, обеспечивает равномерность уровня механических свойств в различных по толщине стенках отливок.

Медистые стали обладают хорошей жидкотекучестью, высокой трещиностойчивостью и хорошей свариваемостью. Для повышения уровня трещиностойчивости в сталях увеличивают содержание Si, Ni, Mn. Для усиления влияния меди в сталь,

содержащую повышенное количество углерода, вводят сильные карбидообразующие элементы (Cr, Ti и т.п.).

На свойства стали и её фазовые превращения медь оказывает влияние, аналогичное никелю – увеличивает прокаливаемость и понижает критическую скорость охлаждения. Величина усадки медистой стали практически не отличается от величины усадки конструкционной нелегированной стали с аналогичным содержанием углерода. Для модифицирования сталей используют В, Са, Се, Y и т.п.

К числу сталей, у которых легирующим элементом является кремний, относится графитизированная сталь. Графитизированная сталь содержит 0,9...1,5% С, 1,0...1,4% Si и 0,5% Mn и характеризуется высокими литейными свойствами. В литом состоянии структура стали представляет собой перлитную матрицу со вторичными выделениями цемента. После проведения термообработки (отжиг при 900°C, с последующим медленным охлаждением в интервале температур 800...700°C) часть вторичного цемента распадается с образованием графитовых выделений.

После термообработки графитизированная сталь хорошо обрабатывается резанием, приобретает повышенные антифрикционные свойства. Графитизированная сталь с 1,35...1,5% С, 1,0...1,35% Si и 0,5% Mn, по сути, сочетает в себе свойства чугуна и стали.

Кремнистые стали обладают хорошим сопротивлением деформациям и повышенной износостойкостью. В литье по выплавляемым моделям наибольшее распространение, из числа кремнистых сталей, получили низкокремнистые низкоуглеродистые стали (0,1...0,2% С и ~1% Si).

Получение отливок из высококремнистой стали методом литья по выплавляемым моделям, сопряжено с определёнными сложностями. Это обусловлено, во-первых, низкой пластичностью стали в литом состоянии, что зачастую является причиной образования в отливках горячих и холодных трещин, во-вторых, поскольку кремний активно понижает растворимость углерода в аустените, то это обстоятельство, при повышенном содержании углерода, во время термообработки приводит к выделению углерода по границам зёрен в виде графита. В результате этого выделения сталь резко охрупчивается и в процессе охлаждения в отливке образуется трещина, в виде так называемого "чёрного излома".

Влияние содержания С и Si на появление "чёрного излома" в отливках из кремнистых сталей представлено на рис. 1.2. Область концентраций углерода и кремния, по данным Ю.А. Нехенджи, при которых образуется "чёрный излом" в отливках, на рис. 1.2 затемнена. Соответственно, во избежание "черноломкости" отливок из высококремнистых сталей, образующейся во время их термической обработки, необходимо подобрать оптимальное отношение содержания в стали углерода и кремния, используя, например, рис.1.2.

По величине жидкотекучести и трещиностойкости низкоуглеродистых кремнистых сталей близки к величинам аналогичных свойств конструкционной нелегированной стали, содержащей 0,2...0,3% углерода. При содержаниях углерода более 0,4% жидкотекучесть и трещиностойкость кремнистых сталей резко понижается. В связи с этим, при получении отливок из кремнистой стали без трещин, необходимо предпринимать

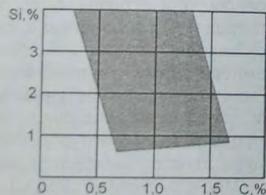


Рис. 1.2. Концентрационная область (по углероду и кремнию) появления в отливках "чёрного излома"

меры, обеспечивающие медленное охлаждение отливок в форме для чего, например, проводить заливку КО в опорном наполнителе при начальной температуре формы 950...1050°C, а также осуществлять рассредоточенный подвод расплава в рабочую полость формы (в отливку).

Кремнистая сталь склонна к образованию газовых раковин и Н.В., имеет большую объёмную и линейную усадку. При этом необходимо отметить, что увеличение содержания кремния в стали значительно понижает температуру её плавления, которая, для стали эвтектического состава, составляет 1190°C.

Низкоуглеродистая кремнистая сталь (0,1...0,2% С и 1% Si) обладает более высокими пластическими свойствами, чем равнопроцентная нелегированная сталь. Высокоуглеродистая кремнистая сталь (0,4...0,5% С и 1,4...1,6% Si) обладает высокой износостойкостью и низкой пластичностью.

Осуществляя выбор той или иной марки стали, как и любого другого литейного сплава, следует учитывать её температурный интервал кристаллизации. При всех прочих равных условиях предпочтение следует отдавать стали (сплаву) с наименьшей величиной интервала кристаллизации, как наиболее технологичному с точки зрения его литейных свойств (трещиностойкости, жидкотекучести и т.п.).

В связи с тем, что в соответствующей технической и справочной литературе информация о температурах кристаллизации есть не на все марки сталей, для определения температуры ликвидуса (t_L), температуры солидуса (t_S) и температурного интервала кристаллизации (Δt_{LS}) низко- и среднелегированных марок сталей рекомендуется воспользоваться нижеприведёнными формулами [9].

Расчёт температуры ликвидуса сталей проводят по формуле (°C):

$$t_L = 1539 - 78C - 12Si - 5(Mn + Cu) - 1,5(Cr + W) - 4Ni - 2(Mo + V + Al + Co) - 10Ti - 150B - 6Zr - 30P - 25S - 80O_2 - 90N - 1300H_2 \quad (1.2)$$

Пределы содержания элементов в стали для расчёта по формуле (1.2): Si – до 5%, Mn – до 9%, Cu – до 7%, Cr – до 5%, W – до 12%, Ni – до 3%, Mo – до 7%, V – до 5%, Al – до 10%, Co – до 15%, Ti – до 3%, B – до 0,1%, Zr – до 5%, P – до 0,7%, S – до 0,08%, O₂ – до 0,03%, N – до 0,03%.

Температуру солидуса (t_S) рассчитывают по формуле:

$$t_S = t_L - \Delta t_{LS} \quad (1.3)$$

где Δt_{LS} – температурный интервал кристаллизации сплава, °C.

$$\Delta t_{LS} = \Delta t_C + \Delta t_3 \quad (1.4)$$

где Δt_C , Δt_3 – температурный интервал кристаллизации стали в зависимости от содержания в ней углерода и остальных химических элементов соответственно, °C.

$$\Delta t_C = 13 + 140C \quad (1.5)$$

$$\Delta t_3 = 4,5(Si + Ni) + 2,5Mn + Cr + 3(Cu + Mo + V + W + Al) + Co + 5Ti \quad (1.6)$$

Пример 1.1. Рассчитать значения t_L , t_S и Δt_{LS} для стали 30ХНМЛ, приняв следующие значения содержания химических элементов, входящих в состав стали: C=0,30%; Mn=0,9%; Si=0,3%; P=0,03%; S=0,02%; Cr=1,5%; Ni=1,4%; Mo=0,25%; Cu=0,01%; N=0,001%; O=0,001%.

Используя формулу (1.2), рассчитываем температуру ликвидус стали 30ХНМЛ:

$$t_L = 1539 - 78,0,30 - 12,0,3 - 5(0,9+0,1) - 1,5(1,5+0) - 4 \cdot 1,4 - 2(0,25 + 0 + 0 + 0) - 10 \cdot 0 - 150 \cdot 0 - 6 \cdot 0 - 30 \cdot 0,03 - 25 \cdot 0,02 - 80 \cdot 0,001 - 90 \cdot 0,001 - 1300 \cdot 0 = 1497^\circ\text{C}$$

Используя формулы (1.4)...(1.6), рассчитываем температурный интервал кристаллизации стали 30ХНМЛ:

$$\Delta t_c = 13 + 140 \cdot 0,30 = 55^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_s = 4,5(0,3 + 1,4) + 2,5 \cdot 0,9 + 1,5 + 3(0,1 + 0,25 + 0 + 0 + 0) + 0 + 5 \cdot 0 = 12,45^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{LS} = 55 + 12,45 = 67^\circ\text{C}$$

Температуру солидус стали 30ХНМЛ рассчитываем по формуле (1.3):

$$t_s = 1497 - 67 = 1430^\circ\text{C}$$

Таким образом, в результате расчёта установлено, что у стали 30ХНМЛ:

$$t_L = 1497^\circ\text{C}; \quad t_s = 1430^\circ\text{C}; \quad \Delta t_{LS} = 67^\circ\text{C}$$

Следует отметить, что изменение химического состава стали в пределах её марки, может изменять значения температур t_L и t_s , а также величину Δt_{LS} в пределах от 5 до 15°C.

Область применения литых деталей из конструкционных легированных сталей приведена в табл. 1.13.

Таблица 1.13
Область применения литых деталей из конструкционных легированных сталей

Марка стали	Область применения
1	2
20ГЛ, 35ГЛ	Детали, к которым предъявляют требования по прочности и вязкости, работающие под действием статических и динамических нагрузок
20ГСП	Детали корпусного типа, работающие при температуре до 450°C
30ГСП, 20Г1ФЛ, 20ФЛ, 30ХГФЛ	Детали, работающие в условиях статических и динамических нагрузок
45ФЛ	Детали с высокой износостойкостью
32ХФЛ	Кронштейны, балансиры и другие ответственные детали
40ХЛ	Детали повышенной прочности, а также работающие на износ
20ХМЛ	Шестерни, крестовины, втулки, зубчатые колёса, а также корпусные детали, работающие при температуре до 500°C
20ХМФЛ	Детали арматуры, корпусные детали, работающие при температуре до 540 °C
20ГНМФЛ	Сварные конструкции больших сечений
35ХМЛ	Детали к которым предъявляют требования по высокой прочности и вязкости, работающие под действием статических и динамических нагрузок
30ХНМЛ	Ответственные нагруженные детали, к которым предъявляют требования по высокой прочности и достаточной вязкости, работающие под действием статических и динамических нагрузок при температуре до 400°C

1	2	Окончание табл. 1.13
35ХГСП	Детали, от которых требуют повышенную износостойкость	
35НГМЛ, 20ДХЛ	Ответственные нагруженные детали, к которым предъявляют требования по высокой прочности и достаточной вязкости, работающие под действием статических и динамических нагрузок	
08ГДНФЛ	Сварные конструкции, ответственные детали, к которым предъявляют требования по высокой вязкости и достаточной прочности, работающие при температуре не более 350°C	
13ХНДФЛ	Сварные конструкции, ответственные нагруженные детали, к которым предъявляют требования по достаточной прочности и вязкости, работающие под действием статических и динамических нагрузок при температуре не более 500°C	
12ДН2ФЛ	Сварные конструкции, ответственные нагруженные детали, к которым предъявляют требования по достаточной прочности и вязкости, работающие под действием статических и динамических нагрузок при температуре не более 400°C	
12ДХН1МФЛ	Сварные конструкции, ответственные нагруженные детали, к которым предъявляют требования по высокой прочности и достаточной вязкости, работающие под действием статических и динамических нагрузок	
23ХГ2МФЛ	Детали ответственного назначения со стенками толщиной до 30 мм, работающие в условиях циклических и ударных нагрузок и в условиях ударно-абразивного износа	
12Х7ГЗСП	Ответственные, высоконагруженные детали, работающие в условиях статических и динамических нагрузок	
25Х2ГНМФЛ	Детали ответственного назначения со стенками толщиной до 50 мм, работающие в условиях статических и динамических нагрузок	
27Х5ГСМЛ	Высоконагруженные детали ответственного назначения со стенками толщиной до 50 мм, работающие в условиях ударных нагрузок и ударно-абразивного износа	
30ХЗСЗГМЛ	Высоконагруженные детали ответственного назначения со стенками толщиной до 30 мм, к которым предъявляют требования по высокой прочности и достаточной вязкости	
03Н12Х5МЗТЛ, 03Н12Х5МЗТЮЛ	Высоконагруженные детали ответственного назначения	

Хладостойкие и износостойкие стали. Хладостойкими называют стали, способные сохранять определённый уровень пластических свойств (противостоять разрушению) при пониженных температурах. При этом основным показателем хладостойкости сталей и сплавов является хладноломкость – свойство сталей и сплавов хрупко разрушаться при отрицательных температурах (ниже 0°C).

Основной особенностью хладостойких литейных сталей является низкое допустимое содержание в сталях серы и фосфора (до 0,02% каждого из элементов). При этом сталь для отливок должна выплавляться в электрических печах с основной футеровкой.

При выплавке хладостойкую литейную сталь в обязательном порядке обрабатывают раскислителями (модификаторами), содержащими щелочноземельные (ЩЗМ) и/или редкоземельные (РЗМ), и/или другие металлы.

Износостойкими называют стали, устойчивые к истиранию. Наиболее распространёнными износостойкими сталями являются стали, содержащие около 13% Mn и около 1,1% С.

Химический состав хладостойких и износостойких сталей приведен в табл. 1.14.

Химический состав хладостойких и износостойких сталей
Таблица 1.14
Содержание элементов, %, по массе (остальное - Fe)

Марка стали	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
08Г2ДнФЛ	0,05-0,10	1,30-1,70	0,15-0,40	≤0,30	1,15-1,55	-
12ХГФЛ	0,10-0,16	0,80-1,40	0,30-0,50	0,20-0,60	≤0,30	-
14Х2ГМРЛ	0,10-0,17	0,90-1,20	0,20-0,42	1,40-1,70	≤0,30	0,45-0,55
20ГЛ	0,17-0,25	1,10-1,40	0,30-0,50	≤0,30	≤0,30	-
20ФЛ	0,17-0,25	0,80-1,20	0,30-0,50	≤0,30	≤0,30	-
20ХГФЛ	0,14-0,22	0,90-1,30	0,50-0,70	0,30-0,60	≤0,40	-
20ХГСФЛ	0,22-0,30	0,50-0,80	0,20-0,40	1,60-1,90	0,60-0,90	0,20-0,30
25Х2МЛ	0,23-0,30	0,60-0,90	0,20-0,42	0,80-1,20	1,65-2,00	0,30-0,50
27ХН2МФЛ	0,22-0,31	0,90-1,50	0,70-1,30	0,70-1,30	0,70-1,20	0,10-0,30
27ХГСНМДТЛ	0,25-0,35	1,20-1,60	0,20-0,50	≤0,30	≤0,30	-
30ГЛ	0,25-0,35	1,50-1,80	0,40-0,80	0,60-1,00	≤0,30	-
30Г2СТЛ	0,25-0,35	0,50-0,90	0,20-0,50	0,50-0,80	≤0,30	-
30ХЛ	0,30-0,40	0,40-0,60	0,20-0,40	0,80-1,10	≤0,30	0,08-0,15
35ХМФЛ	0,30-0,40	0,40-0,90	0,20-0,40	0,90-1,10	≤0,30	0,20-0,30
35ХМЛ	0,90-1,20	11,5-14,5	0,40-0,90	≤0,30	≤0,30	-
110Г13Л	0,90-1,30	11,5-14,5	0,30-0,90	0,80-1,50	≤0,30	-
110Г13ХБРЛ	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы

Марка стали	Содержание элементов, %, по массе (остальное - Fe)				
	V	Cu	Ti	B	Nb
08Г2ДнФЛ	0,02-0,08	0,80-1,10	-	-	-
12ХГФЛ	0,05-0,10	≤0,30	-	-	-
14Х2ГМРЛ	-	≤0,30	-	По расчёту 0,004	-
20ГЛ	-	≤0,30	-	-	-
20ФЛ	0,01-0,06	≤0,30	0,010-0,025	-	-
20ХГФЛ	0,07-0,13	≤0,30	-	-	-
25Х2МЛ	-	≤0,30	-	-	-
27ХН2МФЛ	0,08-0,15	≤0,30	-	-	-
27ХГСНМДТЛ	-	0,30-0,50	0,03-0,07	-	-
30ГЛ	-	≤0,30	-	-	-
30Г2СТЛ	-	≤0,30	0,01-0,04	-	-
30ХЛ	-	≤0,30	-	-	-
35ХМФЛ	0,06-0,12	≤0,30	-	-	-
35ХМЛ	-	≤0,30	-	-	-
110Г13Л	-	≤0,30	-	-	-
110Г13ХБРЛ	-	≤0,30	-	0,002-0,005	0,06-0,10

Примечание: В сталях 08Г2ДнФЛ, 27ХГСНМДТЛ, 30ХГ2СТЛ массовая доля P3M (итриевый черик и др.) должна быть в пределах 0,02 - 0,05%. Для повышения износостойкости отливок из стали 110Г13Л допускается микролегирование стали титаном до 0,05%, ванадием до 0,03%, молибденом до 0,20%.

Режимы термической обработки отливок и механические свойства термически обработанных хладостойких и износостойких сталей приведены табл. 1.15.

Режимы термической обработки отливок
и механические свойства хладостойких и износостойких сталей
Таблица 1.15

Марка стали	Рекомендуемый режим термической обработки	σ _t	σ _b	δ	ψ	KCU ₂₀	KCU ₃₀	НВ
		МПа	МПа	%	%	кДж/кг	кДж/кг	
08Г2ДнФЛ	Нормализация при 930-970°C	400	500	20	45	2,5	4,0	-
	Нормализация при 930-970°C, отпуск при 590-630°C							
12ХГФЛ	Нормализация при 930-950°C	340	470	20	35	2,0	3,0	-
14Х2ГМРЛ	Закалка с 920-930°C в воде, отпуск при 630-650°C	600	700	14	25	3,0	5,0	-
	Нормализация при 920-940°C	300	500	20	35	2,0	3,0	-
20ГЛ	Закалка с 920-940°C в воде, отпуск при 600-620°C	400	550	15	30	2,0	3,0	-
	Нормализация при 940-960°C	320	520	20	35	2,0	3,0	-
20ФЛ	Закалка с 930-950°C в воде, отпуск при 600-650°C	450	570	15	30	2,0	3,0	-
	Нормализация при 900-920°C, отпуск при 630-650°C	320	500	18	30	2,0	3,0	-
20ХГСФЛ	Закалка с 900-920°C в воде, отпуск при 650-670°C	450	600	14	25	2,0	3,0	-
	Закалка с 860-880°C в воде, отпуск при 590-600°C	700	800	12	25	2,5	3,0	-
25Х2МЛ	Закалка с 880-920°C в воде, отпуск при 570-590°C*	800	1000	10	22	2,0	3,0	265
27ХН2МФЛ	Нормализация при 910-930°C, отпуск при 590-610°C	650	800	12	20	3,0	5,0	-
	Закалка с 910-930°C в воде, отпуск при 640-660°C	700	850	12	25	3,5	5,0	-
27ХГСНМДТЛ	Закалка с 910-930°C в воде, отпуск при 200-220°C*	1150	1400	8	12	2,5	4,0	390
	Закалка с 920-950°C в воде, отпуск при 600-650°C	490	660	10	20	2,0	3,0	-
30ГЛ	Нормализация при 890-910°C, отпуск при 640-660°C	600	700	12	40	2,0	3,5	-
	Закалка с 870-890°C в воде, отпуск при 640-660°C	650	750	15	40	2,5	3,5	-
	Закалка с 870-890°C в воде, отпуск при 200-220°C*	1300	1600	4	15	2,0	3,0	400
30ХЛ	Закалка с 920-950°C в воде, отпуск при 600-650°C	550	660	10	20	2,0	3,0	-
	Нормализация при 900-920°C, отпуск при 640-670°C	420	630	12	20	1,8	2,5	-
35ХМФЛ	Закалка с 890-910°C в воде, отпуск при 650-670°C	550	700	12	25	2,0	3,0	-
35ХМЛ	Закалка с 890-910°C в масле, отпуск при 620-640°C	600	700	10	18	2,0	3,0	-
110Г13Л	Закалка с 1050-1100°C в воде*	400	800	25	35	7,0	-	190
110Г13ХБРЛ		480	750	20	30	5,0	-	190

Примечание: * - применяют как износостойкие.

Свариваемость сталей. Особенности используемого сплава, конструкции литой детали или её габаритные размеры не всегда позволяют получить цельнолитую деталь. В случае невозможности получения цельнолитой детали, используют сварно-литые конструкции. При этом для получения качественного и надёжного сварного

соединения деталей или частей детали необходимо учитывать свариваемость вышесказанной стали.

Понятие свариваемости определяет ГОСТ 29273-92, согласно которому металлургический материал считается поддающимся сварке до установленной степени при данных процессах и для данной цели, когда сваркой достигается металлургическая целостность при соответствующем технологическом процессе, чтобы свариваемые детали отвечали техническим требованиям как в отношении их собственных качеств, так и в отношении их влияния на конструкцию, которую они образуют.

Для оценки свариваемости стали используют её характеристику – эквивалентное содержание углерода, наиболее часто рассчитываемое по формуле [1]:

$$C_{экв} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,024 \cdot \delta, \quad (1.7)$$

где содержание химических элементов в стали указано в % (по массе); δ – толщина стенок свариваемых литых деталей или частей детали, мм.

Свариваемость отливок или частей отливки из данной марки стали, тем хуже, чем больше у этой стали и отливки показатель $C_{экв}$. К числу хорошо свариваемых относятся отливки из сталей, у которых $C_{экв} < 0,25$. Для отливок из сталей с величиной $0,25 < C_{экв} \leq 0,40$ требуется подбор оптимальных условий сварки, а для отливок из сталей с величиной $0,40 < C_{экв} \leq 0,45$, кроме этого, требуются ещё и специальные условия сварки, а также последующая термообработка сварно-литого изделия для снятия напряжений. Если $C_{экв} > 0,45$, то такая сталь склонна к образованию трещин при сварке, что требует выполнения определённых специальных технологических мероприятий, направленных на предупреждение возникновения трещин в отливке или сварной конструкции [1; 255].

Конструкционные легированные стали со специальными свойствами (высоколегированные стали). Основными легирующими элементами коррозионно-стойких, жаростойких и жаропрочных сталей являются Cr и Ni. Согласно ГОСТ 977-88, высоколегированные стали классифицируют по структуре, разделяя их на шесть классов: мартенситный, мартенситно-ферритный, ферритный, аустенитно-мартенситный, аустенитно-ферритный, аустенитный. Как правило, на практике используют классификацию данных марок сталей, основанную на предназначении той или иной марки стали. То есть высоколегированные стали разделяют на коррозионно-стойкие и кислотостойкие, жаростойкие и жаропрочные, хладостойкие и кавитационно-стойкие и т.п.

Коррозионно-стойкие стали. Коррозионная стойкость – сопротивление химическому воздействию атмосферы (окислению), пресной и морской воды, кислот, щелочей, спиртов и т.п.

Химическая стойкость железа при добавлении к нему Cr изменяется ступенчато. При этом наиболее существенное изменение химических свойств железа происходит при содержаниях хрома и никеля, кратных $n/8$ молям, где $n=1; 2; 3$ и 4 . То есть наиболее существенное изменение химической стойкости железа наблюдается при содержании в нём при 12,5; 25; 37,5 и 50% атомн. или соответственно 11,7; 23,4; 35 и 48,8% (по массе) хрома в твёрдом растворе (в феррите).

Из вышесказанного следует, что нижний предел содержания Cr в железе, обеспечивающей стали коррозионную стойкость, составляет 11,7%. Тем не менее, поскольку сталь является сплавом железа с углеродом, то часть хрома в стали находится в связанном состоянии в виде карбидов $(Fe,Cr)_7C_3$. Вследствие этого, для придания стали коррозионной стойкости, содержание хрома в ней необходимо не-

сколько увеличить по сравнению с вышеуказанным значением 11,7% Cr. В этом случае минимальное содержание хрома, обеспечивающее коррозионную стойкость стали, рассчитывают по формуле (% по массе):

$$Cr = 12 + 10 \cdot C, \quad (1.8)$$

где C – содержание углерода в сплаве, % (по массе).

Для придания сталям кислотостойкости требуется повышенное содержание хрома в твёрдом растворе. При этом с увеличением содержания хрома в стали образуются карбиды нового типа. В связи с этим минимально допустимое содержание хрома в кислотостойкой стали рассчитывают по формуле (% по массе):

$$Cr = (15 \dots 17) + (16 \dots 18) \cdot C, \quad (1.9)$$

где C – содержание углерода в сплаве, % (по массе).

Поскольку литые детали из кислотостойкой стали работают в самых разных условиях, то легирование стали одним хромом в ряде случаев оказывается недостаточным. Для повышения кислотостойкости таких деталей используют сталь, дополнительно легированную никелем.

Дополнительное легирование никелем высокохромистой стали позволяет значительно улучшить её кислотостойкость в определённых агрессивных средах. При этом влияние никеля на химическую стойкость железа аналогично хрому и кратно $n/8$ молям никеля. Например, по данным В.С. Меськина, стойкость стали при воз-

действии азотной кислоты резко возрастает, если содержание хрома в стали более $n/8$ моля. В то же время, в условиях кипящей серной кислоты стойкость стали резко возрастает при содержании в ней никеля более $n/8$ молей.

Из числа известных марок сталей наибольшей коррозионной стойкостью обладают закалённые стали с аустенитной структурой, содержащие 18% Cr и не менее 8% Ni. Указанное содержание хрома и никеля определяет "классический" состав кислотостойкой стали, сокращённо называемой 18-8 (восемнадцать-восемь).

На рис. 1.3 представлена структурная диаграмма Шеффлера для коррозионно-стойких сталей, позволяющая по величине эквивалентов никеля:

$$Ni_3 = Ni + 20 \cdot C + 0,1 \cdot Mn + 12 \cdot N$$

и хрома

$$Cr_3 = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb + 4 \cdot Ti + 3,5 \cdot Al,$$

где содержание химических элементов указано в % (по массе), прогнозировать структуру стали, которая может быть как однофазной, так и многофазной. На этой

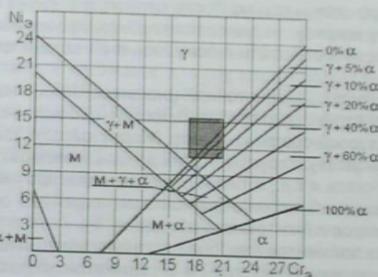


Рис. 1.3. Структурная диаграмма Шеффлера для коррозионно-стойких сталей: м – мартенсит, α – аустенит, γ – феррит

же диаграмме, в качестве примера, затененным прямоугольником выделена область изменения эквивалентов никеля и хрома в пределах марочного изменения химического состава для стали 10X18H9Л.

Из рис. 1.3 видно, что в пределах марочного химического состава сталь 10X18H9Л может быть как однофазной (аустенитной), так и двухфазной (аустенит-ферритной).

Практика изготовления отливок из высоколегированных марок сталей свидетельствует, что присутствие в структуре стали 5...7% второй фазы резко повышает трещиностойкость [84, 93]. То есть двухфазные стали, по сравнению со сталями однофазными, обладают более высокой трещиностойкостью, что позволяет получать отливки из таких двухфазных сталей практически всегда без горячих трещин.

Исходя из этого, при выборе состава стали, в пределах марочного состава, для нетехнологичной конструкции отливки следует использовать и эту возможность повышения её трещиностойкости. При этом следует помнить, что в хромоникелевых аустенитно-ферритных сталях при высоких температурах эксплуатации в результате образования интерметаллида хрома (σ -фазы) резко понижается предел прочности и возрастает хрупкость. Для таких условий эксплуатации отливки из получистых и возрастает хрупкость. Для таких условий эксплуатации отливки из получистых и возрастает хрупкость. Для таких условий эксплуатации отливки из получистых и возрастает хрупкость.

При выборе состава стали также необходимо учитывать и тот факт, что в процессе эксплуатации при сварке или заварке дефектов отливок из сталей типа 18-8 при температуре 500...600°C происходит отпуск стали. После отпуска в отливке или её части, подвергнувшейся локальному нагреву, выделяются карбиды хрома, вызывающие резкое снижение пластических свойств стали и повышение её склонности к межкристаллитной коррозии.

Жаростойкие и жаропрочные стали. Жаростойкой (окалиностойкой) называют сталь, которая обладает большой стойкостью против коррозии или окисления при высокой температуре газовой среды или пара. Жаростойкость стали зависит от характера среды, в которой эксплуатируется литая деталь, температуры и длительности воздействия среды на сталь и т.д., а также от плотности и прочности образующейся на поверхности стали окисной пленки. Чем плотнее и прочнее окисная пленка на металле, тем большей жаростойкостью она обладает.

Из числа применяемых легирующих элементов наиболее плотную окисную пленку на поверхности стали образует Cr, за ним следуют Al и Si. При этом жаростойкость стали повышают те элементы, у которых свободная энергия образования окисла больше, чем свободная энергия образования окислов железа.

Жаропрочной называют сталь, способную сопротивляться пластической деформации и разрушению при температурах, превышающих 550°C, в течение заданного времени. Для оценки жаропрочности сплавов приняты показатели предела длительной прочности и сопротивления ползучести сплава.

Жаропрочность сталей, как и других сплавов, зависит от вида и прочности межатомных связей, структуры материала сплава и механизма высокотемпературной деформации изделия. Наибольшей жаропрочностью обладают стали и сплавы с насыщенным твердым раствором, способные только к структурным изменениям при высоких температурах, в результате которых по границам зерен происходит выделение мелкодисперсных интерметаллидов и фаз внедрения, не способных коагулировать при температурах эксплуатации отливки.

Как правило, в жаропрочных сталях и сплавах реализован принцип высококомпонентности (многокомпонентности), состоящий в использовании большого числа

различных легирующих элементов. При этом, помимо хрома и никеля, жаропрочные стали содержат химические элементы (Al, Ti, Mo, Nb, W, Zr и др.), обеспечивающие дисперсионное твердение стали за счет образования интерметаллидных фаз или карбидов.

Хладостойкие и кавитационностойкие высоколегированные стали. Стальные литые детали сравнительно редко используют в криогенной технике и, в основном, в установках для перекачки криогенных жидкостей в качестве запорно-регулирующей арматуры. В этих случаях к литым деталям и сталям предъявляют ряд специфических требований, а именно: детали должны иметь достаточно высокую плотность (низкую пористость) и высокую герметичность, сталь литой детали должна обладать высоким сопротивлением механической и термической усталости и выдерживать до 4000...5000 циклов захлаживания-отогрева в диапазоне температур криопродукта.

К числу наиболее важных показателей стали относится показатель её хладостойкости. Наиболее быстрый переход в хрупкое состояние при понижении температуры наблюдается у металлов и сплавов с ОЦК-решеткой (стали с ферритной и перлитной структурой). Металлы и сплавы с ГЦК-решеткой (аустенитные стали) сохраняют вязкость при значительно более низких температурах, в связи с чем являются более хладостойкими, то есть менее хладоломкими.

В аустенитных сталях, при всех прочих равных условиях, резкому понижению хладоломкости способствуют примеси P, S, N, O и C, а также ряд цветных металлов, образующих хрупкую прослойку в межзеренном пространстве затвердевшего сплава отливки.

При классификации высоколегированных сталей по назначению, как правило, ни хладостойкие, ни кавитационностойкие стали не выделяют в отдельные группы, поскольку многие специальные свойства сталей сочетаются в пределах одной марки стали. В частности, к числу хладостойких высоколегированных сталей относят стали типа ВНЛ, например, сталь 08X14H7МЛ (ВНЛ-1), 16X14H5M2.5Л (ВНЛ-2), 08X14H5M2ДЛ (ВНЛ-3), 07X21H9МЛ (ВНЛ-4), 15X11H5M5Л (ВНЛ-5), 04X13H5M5K9Л (ВНЛ-6) и т.п., а также азотированные хромомарганцевые стали, например, 07X13AG19Л, 07X13G28АНФЛ и т.п., которые, помимо этого, являются и коррозионностойкими.

Одним из основных требований к свойствам хладостойкой стали является сохранение её достаточно высоких показателей пластических свойств при отрицательных температурах. В частности, некоторые свойства термообработанной хладостойкой стали 08X14H7МЛ (ВНЛ-1) приведены в табл. 1.16.

Таблица 1.16
Свойства стали 08X14H7МЛ (ВНЛ-1)

Показатель	Температура испытаний стали, °С			
	-196	-70	20	300
σ_B , МПа	1660	1370	980	880
$\sigma_{0.2}$, МПа	1170	880	685	637
δ , %	10	10	10	12
ψ , %	15	20	35	30
a (КСУ), кДж/м ²	300	300	400	—
E, МПа	196290	187180	182280	—
Чувствительность к надрезу (средняя)	1,27	1,40	1,42	—

Примечание. E – модуль упругости. Фазовый состав стали: мартенсит – 65...75%, феррит – 35...25%.

К числу кавитационно-стойких сталей относятся стали типа 18-8, например, 12X18H10ТЛ и т.п., а также азотированные хромомарганцевые стали, например, Х18АГ12Л и т.п.

Следует отметить, что в настоящее время литые детали из азотированных хромомарганцевых марок сталей находят всё большее применение, поскольку в отличие от литых деталей, изготовленных из сталей типа 18-8, не содержат дорогостоящих и дефицитный никель. Помимо этого, в ряде случаев кавитационная стойкость литых деталей, изготовленных из азотированных хромомарганцевых марок сталей оказывается более высокой, чем у деталей из хромоникелевых сталей.

Классификация высоколегированных сталей по структуре и назначению приведена в табл. 1.17, а в табл. 1.18 приведен их химический состав. В табл. 1.19 и 1.20 приведены механические свойства высоколегированных сталей и режимы их термобработки.

Классификация высоколегированных сталей

Марка стали	Класс		
	по структуре	по назначению	
20X13Л, 08X14НДЛ, 09X16H4БЛ, 09X17H3СЛ, 10X12НДЛ	Мартенситный	Коррозионностойкие	
15X25ТЛ	Ферритный		
15X13Л	Матренситно - ферритный		
08X15H4ДМЛ, 08X14H7МЛ, 14X18H4Г4Л	Аустенитно - мартенситный		
12X25H5ТМФЛ, 16X18H12C4ТЮЛ, 10X18H3ГЗД2Л	Аустенитно - ферритный		
10X18H9Л, 12X18H9ТЛ, 10X18H11БЛ, 07X17H16ТЛ, 12X18H12M3ТЛ	Аустенитный		
20X12ВНМФЛ	Мартенситный		
15X18H22B6M2PЛ, 20X21H46B8PЛ, 35X18H24C2Л, 31X19H9MB5ТЛ, 12X18H12БЛ, 08X17H34B5T3Ю2PЛ	Аустенитный		Жаропрочные
20X5МЛ, 20X8ВЛ, 40X9С2Л	Мартенситный		Жаростойкие
35X23H7СЛ, 40X24H12СЛ, 20X20H14C2Л	Аустенитно - ферритный		
55X18Г14С2ТЛ, 15X23H18Л, 20X25H19С2Л, 18X25H19СЛ, 45X17Г13H3ЮЛ	Аустенитный		
110Г13Л, 110Г13Х2БРЛ, 110Г13ФТЛ, 130Г14ХМФАЛ, 120Г10ФЛ	Аустенитный	Износостойкие	
85X4M5Ф2B6Л (P6M5Л), 90X4M4Ф2B6Л (P6M4Ф2Л)	Мартенситный	Быстрорежущие	
08X14H7МЛ	Аустенитно - ферритный	Хладостойкие	

Таблица 1.17

Таблица 1.18

Химический состав высоколегированных сталей (ГОСТ 977-88)

Марка стали	Массовая доля элементов, % (остальные - Fe)										Прочие
	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Cu	Не более		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		10
20X5МЛ 20X8ВЛ 20X13Л 08X14НДЛ 09X16H4БЛ 09X17H3СЛ 40X9С2Л 10X12НДЛ 20X12ВНМФЛ	0,15-0,25	0,35-0,70	0,40-0,60	4,0-6,5	Мартенситный класс	0,040	0,040	До 0,3	0,40-0,65 Мо 1,25-1,75 W		0,40-0,65 Мо 1,25-1,75 W
	0,15-0,25	0,30-0,60	0,30-0,50	7,5-9,0	До 0,50	0,040	0,035	До 0,3			
	0,15-0,25	0,20-0,80	0,30-0,80	12,0-14,0	До 0,50	0,030	0,025	До 0,3			
	До 0,08	0,20-0,40	0,30-0,60	13,5-15,0	1,20-1,60	0,030	0,030	1,2-1,6			
	0,05-0,13	0,20-0,60	0,30-0,60	15,0-17,0	3,5-4,5	0,030	0,025	До 0,3	0,05-0,20 Nb		
	0,05-0,12	0,80-1,50	0,30-0,80	15,0-18,0	2,8-3,8	0,035	0,030	До 0,3			
	0,35-0,50	2,00-3,00	0,30-0,70	8,0-10,0	До 0,50	0,035	0,030	До 0,3			
	До 0,10	0,17-0,40	0,20-0,60	11,5-13,0	1,00-1,50	0,025	0,025	0,8-1,1	0,05-0,7 Мо; 0,15-0,30 V; 0,7-1,1 W		
	0,17-0,23	0,20-0,60	0,50-0,90	10,5-12,5	0,50-0,90	0,030	0,025	До 0,3			
	15X13Л	До 0,15	0,20-0,80	0,30-0,80	12,0-14,0	До 0,50	0,030	0,025	До 0,3		
15X25ТЛ	0,10-0,20	0,50-1,20	0,50-0,80	23,0-27,0	До 0,50	0,035	0,030	До 0,3		0,5-1,0 Мо	
08X14H7МЛ	До 0,08	0,20-0,75	0,30-0,90	13,0-15,0	6,0-8,5	0,030	0,030	До 0,3		0,30-0,45 Мо	
14X19H4Г4Л	До 0,14	0,20-1,00	4,00-5,00	16,0-20,0	4,0-5,0	0,035	0,030	До 0,3		0,06-0,12 Мо; 0,07-0,15 V; 0,08-0,20 Ti; 0,08-0,20 N	
08X15H4ДМЛ	До 0,08	До 0,40	1,00-1,50	14,0-16,0	3,5-3,9	0,025	0,025	1,0-1,4		0,4-0,7 Ti; 0,13-0,35 Al	
12X25H5ТМФЛ	До 0,12	0,20-1,00	0,30-0,80	23,5-26,0	5,0-6,5	0,030	0,030	До 0,3		1,8-2,2	
35X23H7СЛ	До 0,35	0,50-1,20	0,50-0,85	21,0-25,0	6,0-8,0	0,035	0,035	До 0,3			
40X24H12СЛ	До 0,40	0,50-1,50	0,30-0,80	22,0-26,0	11,0-13,0	0,035	0,030	До 0,3			
20X20H14С2Л	До 0,20	2,00-3,00	До 1,50	19,0-22,0	12,0-15,0	0,035	0,025	До 0,3			
16X18H12C4ТЮЛ	0,13-0,19	3,80-4,50	0,90-1,00	17,0-19,0	11,0-13,0	0,030	0,030	До 0,3			
10X18H3ГЗД2Л	До 0,10	До 0,60	2,30-3,00	17,0-19,0	3,0-3,5	0,030	0,030	До 0,3			

		10									
		Аустенитный класс									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
07X18H9Л	До 0,07	0,20-1,00	1,00-2,00	17,0-20,0	8,0-11,0	0,95	0,95	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti
10X18H9Л	0,07-0,14	0,20-1,00	1,00-2,00	17,0-20,0	8,0-11,0	0,95	0,95	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti
07X17H16Л	0,04-0,10	0,20-0,60	1,00-2,00	16,0-18,0	15,0-17,0	0,95	0,95	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti
12X18H9Л	До 0,12	0,20-1,00	1,00-2,00	17,0-20,0	8,0-11,0	0,95	0,95	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti
10X18H116Л	До 0,10	0,20-1,00	1,00-2,00	17,0-20,0	8,0-11,0	0,95	0,95	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti
12X18H12М3Л	До 0,12	0,20-1,00	1,00-2,00	16,0-19,0	11,0-13,0	0,95	0,95	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti
55X18H14С2Л	0,45-0,8	1,80-2,50	12,0-16,0	16,0-19,0	11,0-13,0	0,95	0,95	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti
15X23H18Л	0,10-0,20	0,20-1,00	1,00-2,00	16,0-19,0	11,0-13,0	0,95	0,95	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti
20X25H19С2Л	До 0,20	2,00-3,00	10,0-15,0	22,0-25,0	17,0-20,0	0,95	0,95	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti
18X25H19СЛ	До 0,18	0,80-2,00	3,00-7,00	10,0-15,0	7,0-10,0	0,95	0,95	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti
45X17Г13Н3ЮЛ	0,40-0,50	0,80-1,50	12,0-15,0	16,0-18,0	17,0-21,0	0,95	0,95	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti
15X18H22В6М2РЛ	0,10-0,20	0,20-0,60	0,30-0,60	15,0-18,0	20,0-24,0	0,95	0,95	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti
08X17H34В5Т3Ю2РЛ	До 0,8	0,20-0,50	0,30-0,60	15,0-18,0	32,0-35,0	0,10	0,10	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti
20X21H46В8РЛ	0,10-0,25	0,20-0,80	0,30-0,80	19,0-22,0	43,0-48,0	0,040	0,040	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti
35X18H24С2Л	0,30-0,40	2,00-3,00	17,0-20,0	23,0-25,0	0,95	0,95	0,95	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti
110Г13Л	0,90-1,40	0,30-1,00	11,5-15,0	До 1,0	До 1,0	0,120	0,120	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti
110Г13Х2ВРЛ	1,00-1,40	0,30-1,00	11,5-14,5	1,5-2,5	До 1,0	0,100	0,100	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti
10Х17Н10АМ6Л	До 0,12	До 0,60	3,90-4,50	16,0-18,0	9,5-11,0	0,025	0,025	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti
130Г14ХМФЛ	1,20-1,40	До 0,60	12,5-15,0	1,0-1,5	До 1,0	0,070	0,070	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti
31Х19Н9МВ5Л	0,26-0,35	До 0,80	0,80-1,50	18,0-20,0	8,0-10,0	0,035	0,035	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti
12Х18Н12БЛ	До 0,12	До 0,55	0,50-1,00	17,0-19,0	11,0-13,0	0,020*	0,025	До 0,3	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti	0,005-0,15 Ti

Примечание. 1. Наличие допустимое содержание и необходимость контроля элементов, не являющихся легирующими, устанавливается в конструкторской (КД) или нормативно-технической (НТД) документации. 2. В стали 20Х5МЛ молибден может быть заменен титаном в количестве не более 0,1% при условии работы деталей при температуре не более 425 °С. 3. В стали 10Х18Н9Л, в случае необходимости обеспечения большей стойкости против межкристаллитной коррозии, содержание углерода может быть установлено не более 0,07%. 4. В стали 20Х13Л допускается, при выплавке в индукционной печи, повышение массовой доли серы до 0,03%. 5. В стали 12Х18Н12БЛ суммарная массовая доля серы и фосфора должна быть не более 0,040%. 6. В сталях 12Х18Н12БЛ и 15Х18Н10Г2С2М2Л допускается, для стабилизации, вместо титана использовать ниобий с танталом в количестве от (8х%) до 1,2%. 7. В сталях 08Х17Н34В5Т3Ю2РЛ, 15Х18Н22В6М2РЛ, 20Х21Н46В8РЛ содержание и необходимость контроля бора и церия устанавливается в КД и (или) НТД.

Режимы термической обработки отливок из высоколегированных сталей

Таблица 1.19

Марка стали	Рекомендуемый режим термической обработки
20Х5МЛ, 20Х8ВЛ	Отжиг при 940-960°С, нормализация при 940-960°С, охлаждение на воздухе; отпуск при 680-720°С, охлаждение на воздухе
20Х13Л	Отжиг при 940-960°С, закалка с 1040-1060°С, охлаждение в масле или на воздухе; отпуск при 740-760°С, охлаждение на воздухе
08Х14НДЛ	Закалка с 1000-1200°С, охлаждение на воздухе; отпуск при 660-700°С, охлаждение на воздухе
09Х16Н4БЛ ¹	Нормализация при 1040-1060°С, охлаждение на воздухе; отпуск при 600-620°С, охлаждение на воздухе; закалка с 950-1050°С, охлаждение в масле или на воздухе; отпуск при 600-620°С, охлаждение на воздухе
09Х16Н4БЛ ²	Нормализация при 1040-1060°С, охлаждение на воздухе; отпуск при 600-620°С, охлаждение на воздухе; закалка с 950-1050°С, охлаждение в масле; отпуск при 290-310°С, охлаждение на воздухе
09Х17Н3СЛ ¹	Отжиг при 660-670°С, закалка с 1040-1060°С, охлаждение в масле; отпуск при 300-350°С, охлаждение на воздухе
09Х17Н3СЛ ²	Закалка с 1040-1060°С, охлаждение в масле; отпуск при 540-560°С, охлаждение на воздухе
09Х17Н3СЛ ³	Отпуск при 670-690°С, охлаждение на воздухе
10Х12НДЛ	Нормализация при 940-960°С, охлаждение на воздухе или закалка с 950-1050°С, охлаждение со скоростью 30°С/ч; отпуск при 650-680°С
15Х13Л	Отжиг при 940-960°С, закалка с 1040-1060°С, охлаждение в воде, масле или на воздухе; отпуск при 740-760°С, охлаждение на воздухе
08Х14Н7МЛ	Закалка с 1090-1110°С, нагрев в защитной среде, охлаждение на воздухе; обработка холодом при минус 50-70°С; отпуск при 250-350°С, охлаждение на воздухе
14Х18Н4Г4Л	Закалка с 1020-070°С, охлаждение в воде
08Х15Н4ДМЛ	Закалка с 1030-1050°С, охлаждение на воздухе; отпуск при 600-620°С, охлаждение на воздухе
12Х25Н5ТМФЛ	Закалка с 1140-1160°С, охлаждение с печью до 970-990°С, далее в масле
40Х24Н12СЛ	Закалка с 1040-1060°С, охлаждение в воде, масле или на воздухе
20Х20Н14С2Л	Нормализация при 1100-1150°С, охлаждение на воздухе
16Х18Н12С4ТЮЛ	Закалка с 1150-1200°С, охлаждение на воздухе
10Х18Н3Г3Д2Л	Нормализация при 1100-1150°С, охлаждение на воздухе. Отпуск первый при 790-810°С, охлаждение до 20°С. Отпуск второй при 590-610°С
10Х18Н9Л	Закалка с 1050-1100°С, охлаждение в воде, масле или на воздухе
07Х17Н16ТЛ	Закалка с 1050-1100°С, охлаждение в воде
12Х18Н9ТЛ	Закалка с 1050-1100°С, охлаждение в воде, масле или на воздухе
10Х18Н11БЛ	Закалка с 1100-1150°С, охлаждение в воде
12Х18Н12М3Л	Закалка с 1100-1150°С, охлаждение в воде
55Х18Г14С2ТЛ	Без термической обработки
15Х23Н18Л	Закалка с 1050-1100°С, охлаждение в воде
20Х25Н19С2Л	Закалка с 1090-1110°С, охлаждение в воде, масле или на воздухе
18Х25Н19СЛ	Закалка с 1090-1110°С, охлаждение в воде, масле или на воздухе
15Х18Н22В6М2РЛ	Старение при 890-910°С, 5 ч охлаждение на воздухе
08Х17Н34В5Т3Ю2РЛ	Закалка с 1140-1160°С, охлаждение на воздухе; старение при 740-760°С, 32 ч охлаждение на воздухе
20Х21Н46В8РЛ	Старение при 890-910°С, 5 ч охлаждение на воздухе
35Х18Н24С2Л	Закалка с 1140-1160°С, охлаждение в воде
110Г13Л	Закалка с 1050-1100°С, охлаждение в воде
110Г13Х2ВРЛ	Закалка с 1050-1100°С, охлаждение в воде
130Г14ХМФЛ	Закалка с 1120-1150°С, охлаждение в воде
31Х19Н9МВ5Л	Закалка с 1150-1180°С, охлаждение в воде, старение при 700-800°С
12Х18Н12БЛ	Закалка с 1170-1190°С, охлаждение на воздухе; двойное старение: 790-810°С, 10 ч и 740-760°С, 16 ч

Примечание. ^{1,2,3} – режимы термообработки, обеспечивающие получение уровня механических свойств, указанного в табл. 1.20. Отливки из сталей 40Х9С2Л, 35Х23Н7СЛ, 15Х25ТЛ и 45Х17Г13Н3ЮЛ не термообработаются. Крупные отливки из стали 20Х12ВНМФЛ термообработывают по специальному режиму (см. ГОСТ 977-88), мелкие отливки (толщина стенки до 5 мм) могут быть только нормализованы при 1070...1090 °С.

Механические свойства высоколегированных сталей Таблица 1.20

Марка стали	σв, МПа		σт, МПа		δ, %	ψ, %	КСУ, кДж/м ²	Марка стали	σв, МПа		σт, МПа		δ, %	ψ, %	КСУ, кДж/м ²
	σв	σт	σв	σт					σв	σт					
20Х5МЛ	589	392	16	30	392		40Х24Н12СЛ	491	245	20	28				
20Х8ВЛ	589	392	16	30	392		20Х20Н14С2Л	491	245	20	25				
20Х13Л	589	441	16	40	392		16Х18Н12С4ТЮЛ	491	245	15	30	275			
08Х14Н4ДЛ	648	510	15	40	590		10Х18Н3Г3Д2Л	687	491	12	30	275			
09Х16Н4БЛ	932	785	10	—	392		10Х18Н9Л	441	177	25	35	981			
09Х16Н4БЛ	1128	883	8	15	245		07Х17Н16ТЛ	441	196	40	55	392			
09Х17Н3СЛ	981	736	8	20	196		12Х18Н9ТЛ	441	196	25	32	590			
09Х17Н3СЛ*	932	736	8	—	245		10Х18Н1БЛ	441	196	25	35	590			
09Х17Н3СЛ*	834	638	6	10	—		12Х18Н12М3ТЛ	441	216	25	30	590			
40Х9С2Л	Не нормируется							55Х18Г14С2ТЛ	638	—	6	—	147		
10Х12НДЛ	638	441	14	30	294		15Х23Н18Л	540	294	25	30	981			
20Х12ВНМФЛ	589	491	15	30	294		20Х25Н19С2Л	491	245	25	28	—			
15Х13Л	540	392	16	45	491		18Х25Н19СЛ	491	245	25	28	—			
15Х25ТЛ	441	275	—	—	—		45Х17Г13Н3ЮЛ	491	—	10	18	981			
08Х14Н7МЛ	981	687	10	25	294		15Х18Н22В6М2РЛ	491	196	5	—	—			
14Х18Н4Г4Л	441	245	25	35	981		08Х17Н34В5Т3Ю2РЛ	785	687	3	3	—			
08Х15Н4ДМЛ	736	589	17	45	981		20Х21Н4В6В8РЛ	441	—	6	8	294			
12Х25Н5ТМФЛ	540	392	12	40	294		35Х18Н24С2Л	549	294	20	25	—			
35Х23Н7СЛ	540	245	12	—	—		110Г13Х2БРЛ	—	491	22	30	1962			
40Х24Н12СЛ	491	245	20	28	—		130Г14ХМФАЛ	883	441	50	40	2453			
20Х20Н14С2Л	491	245	20	25	—		31Х19Н9МВБТЛ	540	294	12	—	294			
16Х18Н12С4ТЮЛ	491	245	15	30	275		12Х18Н12БЛ	392	196	13	18	196			

Примечание. * — уровень механических свойств обеспечивают режимы термической обработки, указанные в табл. 1.19.

В табл. 1.21, для некоторых марок высоколегированных сталей, приведены значения их температуры t_L и t_S , а также величина Δt_{LS} .

Таблица 1.21

Температуры ликвидус, солидус и температурные интервалы кристаллизации высоколегированных марок сталей

Марка стали	Температура, °С		Δt_{LS} , °С	Марка стали	Температура, °С		Δt_{LS} , °С
	t_L	t_S			t_L	t_S	
20Х13Л	1590	1430	70	20Х26Н10Л	1450	1390	60
20Х15Л	1498	1427	71	20Х25Н12В4Л	1450	1385	65
08Х14Н4МЛ	1472	1430	42	10Х25Н5Л	1425	1360	65
10Х18Н2Л	1495	1420	75	10Х25Н5ТМФЛ	1430	1365	65
10Х18Н9Л	1480	1415	65	10Х21Н4Д4Л	1438	1413	25
12Х18Н8М4ТЛ	1470	1405	65	10Х18Н45Л	1362	1335	27
10Х18Н8М4ДЛ	1460	1405	55	40Х25Н20Л	1380	1348	32
Х18Н5Г12АФЛ	1380	1317	63	110Г13Л	1390	1250	140

Хромистые, коррозионностойкие и жаростойкие стали мартенситного и ферритного классов. В хромистых, коррозионностойких и жаростойких сталях (20Х13Л — мартенситного класса, 12Х18ТЛ, 15Х25ТЛ и т.п. — ферритного класса) основным легирующим элементом является хром, обеспечивающий им высокую кор-

розионную стойкость, в том числе и стойкость против межкристаллитной коррозии, и жаростойкость до 1100°С. Присутствие титана в сталях повышает их стойкость против межкристаллитной коррозии за счёт связывания углерода в карбиды титана (TiC). С целью повышения износостойкости и твердости в хромистых сталях увеличивают содержание углерода до 0,5...1,5% (стали типа Х28Л), обеспечивая получение в стали ферритно-карбидной структуры.

Хромистые стали обладают умеренными литейными свойствами, склонны к пленообразованию при заливке металла в формы. При этом, по данным [67], наибольшее воздействие на склонность стали к пленообразованию оказывают химически активные элементы в следующем порядке убывания — Al, Ti, Cr, Si.

Жидкотекучесть высокохромистой стали несколько выше жидкотекучести конструкционной нелегированной стали с аналогичным содержанием углерода и возрастает с увеличением содержания хрома. Для предотвращения образования литейных дефектов в отливках заливок сталей в формы проводят с повышенной удельной скоростью. По сравнению с конструкционной хромистой сталью удельную скорость заливки стали с высоким содержанием нелегированной стали следует увеличивать в 1,5...2,0 раза. Высокохромистая сталь склонна к образованию усадочных раковин и трещин в отливках. Повышение температуры заливки и низкая интенсивность теплоотвода во время кристаллизации способствует образованию крупнокристаллической структуры в стенках отливок и, соответственно, понижению механических свойств стали.

Поскольку ферритные стали не претерпевают полиморфных превращений ни при нагреве, ни при охлаждении, то изменить размер первичного литого зерна стали путем её термообработки невозможно. Поэтому для измельчения зерна в отливках проводят модифицирование хромистых сталей азотом, титаном, ниобием или цирконием. При этом необходимо учитывать, что при значительном содержании азота, в отливках могут образовываться газовые раковины (азотная пористость). По данным В.И. Просвирина, Н.С. Крещановского и Р.П. Залетаева, во избежание образования газовых раковин в отливках, содержание азота в сталях не должно превышать (0,0100...0,0133)·Cr.

Хромоникелевые коррозионностойкие стали мартенситного класса.

Хромоникелевые коррозионно-стойкие стали 10Х12НДЛ, 10Х14НДЛ и 09Х16Н4БЛ обладают высокой жидкотекучестью, склонны к пленообразованию при заливке, образованию грубой транскристаллитной структуры и, следовательно, горячих и холодных трещин в отливках. В связи с отсутствием фазовой перекристаллизации термообработкой невозможно изменить первичную структуру аустенитных сталей. С целью измельчения первичного зерна в отливках стали модифицируют: 0,1% Се и 0,10...0,15% N, 0,3% Се, 0,06...0,1% В, 0,1% Са или добавками Ti и Zr. Значительное количество хрома и относительно небольшое количество никеля и углерода, в составе сталей, оказывается недостаточным для образования в структуре сталей стабильной формы аустенита. Поэтому стальные отливки подвергают термообработке, что после закалки и отпуска позволяет получать литые детали со структурой высокопрочного мартенсита.

Сталь 10Х12НДЛ имеет высокую кавитационную стойкость в пресной воде. Сталь 10Х14НДЛ за счёт дополнительного легирования медью хорошо сваривается, имеет высокую коррозионную стойкость в морской воде и, в частности, используется для изготовления гребных винтов. Жидкотекучесть сталей возрастает с увеличением содержания в них углерода и никеля. Механические свойства этих сталей весьма чувствительны к изменению условий литья.

Хромоникелевые коррозионностойкие и жаростойкие стали аустенитного класса. Низкоуглеродистые стали, содержащие более 8...10% Ni и около 18% Cr (например, 10Х18Н9Л), в закаленном состоянии обладают стабильной аустенит-

ной структурой. Для предупреждения межкристаллитной коррозии в сталь с аустенитной структурой дополнительно вводят титан (например, 12X18H9ТЛ), тантал или ниобий в количествах (% по массе): Ti – от 5(%С-0,03) до 0,8%; Ta=16 %С; Nb=8 %С. Механизм воздействия Ti, Ta и Nb на свойства стали, основан на связывании углерода в карбиды, вследствие чего хром полностью остаётся в твёрдом растворе. Введение в стали типа 18-8 вышеуказанных элементов должно быть строго ограничено, поскольку титан и ниобий в значительных количествах способствуют го образованию двухфазной (аустенитно-ферритной) структуры стали, что понижает коррозионную стойкость стали и склонность к межкристаллитной коррозии. Кроме того, титан в количествах, превышающих 0,02...0,03%, существенно ухудшает литое, титан в количествах, превышающих 0,02...0,03%, существенно ухудшает литое.

Введение в сталь меди или молибдена способствует повышению коррозионной стойкости стали, при этом для сохранения аустенитной структуры в стали увеличивают содержание никеля (например, 12X18H12M3ТЛ).

Если от стали хотят добиться ещё большего повышения коррозионной стойкости и жаростойкости, сталь дополнительно легируют хромом и кремнием и, соответственно, для сохранения аустенитной структуры – никелем (например, 18Х25Н19СЛ).

Для получения однофазной (аустенитной или ферритной) структуры стали всегда придерживаются определённого, граничного, соотношения ферритообразующих и аустенитообразующих химических элементов, входящих в её состав. Отступление от этого соотношения приводит к формированию двухфазной структуры стали. При этом, как было отмечено выше, для некоторых марок сталей переход от однофазной к двухфазной структуре может быть реализован в пределах изменения химического состава стали, предусмотренного ГОСТ.

С точки зрения образования трещин в стальных отливках, наиболее технологичными являются двухфазные стали или стали, обладающие наибольшей величиной показателя ударной вязкости в литом (нетермообработанном) состоянии.

С целью возможности проведения соответствующего выбора или корректировки химического состава хромоникелевых, коррозионнстойких сталей, на структурной диаграмме Шеффлера (см. рис. 1.4.) нанесены области, соответствующие различной величине ударной вязкости хромоникелевых сталей в литом нетермообработанном состоянии [238].

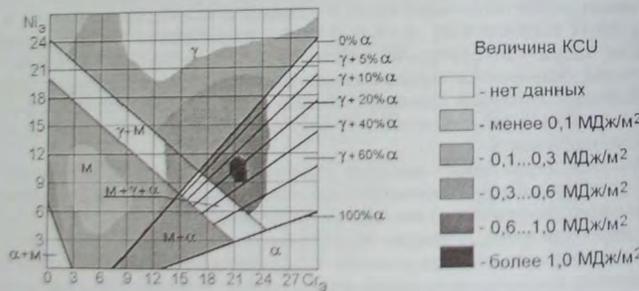


Рис. 1.4 Структурная диаграмма Шеффлера с полями величин ударной вязкости сталей в литом нетермообработанном состоянии

Полутонами на диаграмме выделены области соответствующих значений КСУ (МДж/м²) сталей в литом, нетермообработанном состоянии. Выбор или корректировку химического состава коррозионнстойких, хромоникелевых сталей с целью предупреждения образования в нетехнологичных отливках трещин рекомендуется проводить исходя из расчета эквивалентов никеля и хрома (в пределах изменения марочного состава стали), обеспечивающих величину ударной вязкости стали в литом нетермообработанном состоянии не менее 0,2...0,3 МДж/м².

Хромоникелевые жаропрочные стали аустенитного класса. Жаропрочные хромоникелевые стали относятся к разряду сложноголегированных марок сталей, где требуемый уровень жаропрочности достигается путём дополнительного легирования стали вольфрамом и молибденом (например, 15X18H22ВМ2Л), либо за счёт дисперсионного твердения стали (например, 08X17H34В5Т3Ю2Л) с образованием в высоколегированном твёрдом растворе частиц интерметаллидов (Ni₃Al и Ni₃Ti).

Данные стали обладают удовлетворительными литейными свойствами, склонны к пленообразованию в жидком состоянии и химическому взаимодействию с КО, изготовленной на основе двуокиси кремния. В связи с вышеизложенным, отливки из данных сталей преимущественно получают в условиях вакуума с использованием КО, изготовленных на основе белого электрокорунда.

Износостойкая сталь мартенситного класса. Хромокремнистая износостойкая сталь 40Х9С2Л применяется для изготовления нагруженных деталей, длительно работающей при температуре до 700°С. Сталь имеет плохие литейные свойства и склонна к образованию горячих и холодных трещин в отливках. При медленном охлаждении в интервале температур 600...800°С в структуре стали образуется σ -фаза, резко охрупчивающая сталь. Кроме того, в результате медленного охлаждения при 400...450°С в стали развивается так называемая "475° хрупкость". В связи с этим в технологии получения отливок необходимо предусматривать заливку стали в КО, не заформованные в опорный наполнитель. По возможности сталь 40Х9С2Л заменяют сталью ферритного класса – Х6С2МЛ.

Высокомарганцовистая износостойкая сталь аустенитного класса. Из числа высоколегированных, высокоуглеродистых сталей в цехах литья по выплавляемым моделям наибольшее распространение получила высокомарганцовистая сталь 110Г13Л (сталь Гадфильда) и сталь 110Г13Х2БРЛ (см. ГОСТ 977-88). Сталь, содержащая около 1% углерода и около 13% марганца, обладает уникальным свойством – высоким сопротивлением износу при работе в условиях ударно-абразивных нагрузок.

Упрочнение стали в процессе работы происходит в результате наклёпа (пластической деформации поверхностного слоя отливки, вызванного ударом), что повышает твёрдость стали (НВ) со 170...200 до 400...550 ед. В отсутствие наклёпа сталь истирается так же быстро, как и углеродистая сталь.

Сталь 110Г13Л обладает высокой жидкотекучестью. Из-за низкой теплопроводности сталь склонна к образованию в отливках трещин и грубой транскристаллитной структуры. С целью измеления структуры в сталь дополнительно вводят 0,4...0,5% Ti или 0,1...0,2% Zr.

Склонность стали к наклёпу приводит к тому, что сталь очень плохо обрабатывается резанием. Отливки из стали Гадфильда используют только после термической обработки (закалка в воде с 1100°С), поскольку в литом состоянии наличие толстой сетки карбидов по границам зёрен значительно охрупчивает сталь.

Свойства данной стали в значительной степени зависят от того, что сталь очень плохо обрабатывается резанием. Отливки из стали Гадфильда используют только после термической обработки (закалка в воде с 1100°С), поскольку в литом состоянии наличие толстой сетки карбидов по границам зёрен значительно охрупчивает сталь.

Свойства данной стали в значительной степени зависят от того, что сталь очень плохо обрабатывается резанием. Отливки из стали Гадфильда используют только после термической обработки (закалка в воде с 1100°С), поскольку в литом состоянии наличие толстой сетки карбидов по границам зёрен значительно охрупчивает сталь.

кремния понижается температура ливидус стали и, соответственно, возрастает её жидкотекучесть. Износостойкость и плотность стали в отливках, во многом, зависит от содержания в ней окиси марганца. Чем меньше содержание окиси марганца в стали, тем выше износостойкость и плотность металла отливки, изготовленных из данной стали.

Во избежание химического пригара, получение отливок из высокомарганцовистых сталей следует проводить с использованием КО, не содержащих в лицевого слоя глины или электрокорунда. В некоторых случаях при получении толстоственных отливок в качестве пылевидного материала огнеупорной суспензии, используемой для выполнения первого слоя КО, применяют периклаз или хромитопериклаз.

Отливки от литниково-питающей системы (ЛПС) следует отделять на металлорежущих станках, либо, если отливка невелика, путем её отламывания от питателя.

При отделении отливок от ЛПС огневой резки после закалки приводит к выделению трещины. Использование огневой резки после закалки приводит к выделению карбидов из твёрдого раствора, что способствует охрупчиванию стали.

Литые детали из высоколегированных марок сталей используют в самых разных областях техники. Общая характеристика и область применения литых деталей из числа наиболее распространённых высоколегированных марок сталей приведена в табл. 1.22.

Таблица 1.22

Характеристика и область применения высоколегированных сталей

Марка стали	Характеристика	Область применения
1	2	3
15X13Л	Коррозионностойкая в атмосферных условиях, в речной и водопроводной воде. Наивысшая коррозионная стойкость достигается после термической обработки и полировки деталей	Детали с повышенной пластичностью, подвергающиеся ударным нагрузкам (турбинные лопатки, арматура крекин-установок и др.), а также изделия, подвергающиеся действию относительно слабых агрессивных сред (атмосферные осадки, влажный пар, водные растворы солей органических кислот при комнатной температуре)
20X13Л	Несколько менее коррозионностойка в атмосферных условиях по сравнению со сталью 15X13Л	Детали, подвергающиеся ударным нагрузкам (турбинные лопатки, арматура крекин-установок, сегменты сопел, предметы домашнего обихода и др.), а также изделия, подвергающиеся действию слабых агрессивных сред (атмосферные осадки, влажный пар, водные растворы солей органических кислот при комнатной температуре)
08X14НДЛ	Коррозионностойкая в морской воде и атмосферных условиях. Коррозионная стойкость выше, чем у сталей 15X13Л и 20X13Л	Детали, работающие в морской воде
09X16Н4БЛ	Коррозионностойкая. Высокопрочная при нормальной температуре, устойчива против окисления в атмосферных условиях при температуре до 500°С	Детали повышенной прочности для авиационной, ракетно-космической, химической и других отраслей промышленности
09X17НЗСЛ	Коррозионностойкая. Высокопрочная при нормальной температуре	Детали повышенной прочности для авиационной, химической и других отраслей промышленности, работающие в средах средней агрессивности (азотная и слабые органические кислоты, растворы солей органических и неорганических кислот)

Продолжение табл. 1.22

1	2	3
20X5МЛ	Жаростойкая в горячих нефтяных средах, содержащих сернистые соединения. Жаростойкость до 600°С	Детали арматуры нефтеперерабатывающих установок, корпуса насосов и др. детали, работающие в нефтяных средах под давлением при температуре до 550°С
20X8ВЛ	Жаростойкая в более агрессивных средах по сравнению со сталью марки 20X5МЛ. Жаростойкость до 600°С	Те же детали, работающие в условиях сильно сернистых нефтяных сред под давлением и при температуре до 575°С
40X9С2Л	Жаростойкая при температуре до 800°С, жаропрочная при температуре до 700°С	Детали, работающие длительное время под нагрузкой при температуре до 700°С
10X12НДЛ	Кавитационностойкая. Коррозионностойкая и эрозионностойкая в условиях проточной воды. Не склонна к отпускной крупности, не флокочувствительна	Детали, работающие в условиях кавитационного разрушения
20X12ВНМФЛ	Коррозионностойкая, жаропрочная до 650°С	Литые детали турбин с рабочей температурой до 600°С
15X25ТЛ	Коррозионностойкая, жаростойкая при температуре до 1100°С. Обладает удовлетворительной сопротивляемостью межкристаллитной коррозии	Детали, не подвергающиеся воздействию постоянных и переменных нагрузок (аппаратура для дымящейся азотной или фосфорной кислоты), детали химического машиностроения, в том числе работающие в условиях контакта с мочевиной, печная арматура и др.
08X15Н4ДМЛ	Коррозионностойкая в морской воде и атмосферных условиях. По сравнению с 08X14НДЛ менее чувствительна к концентраторам напряжений	Детали, работающие в морской воде
08X14Н7МЛ	Коррозионностойкая, хладостойкая	Детали изделий, работающих при комнатной и низкой температуре (до минус 196°С)
14X18Н4Г4Л	Коррозионностойкая. Обладает большей, чем сталь марки 10X18Н9Л, склонностью к межкристаллитной коррозии	Арматура для химической промышленности, коллекторы выхлопных систем и др.
12X25Н5ТМФЛ	Коррозионностойкая, жаростойкая при температуре до 600°С	Арматура химической промышленности, детали авиационной и других отраслей промышленности, а также детали, работающие при давлении до 30 МПа
16X18Н12С4ТЮЛ	Коррозионностойкая	Сварные изделия, работающие в агрессивных средах, в частности, в концентрированной азотной кислоте при температуре 105°С
35X23Н7СЛ	Коррозионностойкая в сернистых средах, жаростойкая при температуре до 1000°С	Детали, работающие при температуре до 1000°С. Рекомендуется взамен стали марки 40X24Н12СЛ
40X24Н12СЛ	Коррозионностойкая, жаростойкая при температуре до 1000°С, жаропрочная	Детали, работающие при высокой температуре и давлении (лопатки компрессоров, крепёжные детали и др.)
20X20Н14С2Л	Жаростойкость до 1000–1050°С, устойчива в науглероживающей среде	Детали, работающие при высоких температурах в нагруженном состоянии
10X18НЗГЗДЛ	Кавитационностойкая, имеет большую стойкость от песчаной эрозии по сравнению со сталью марки 10X12НДЛ	Детали, работающие в условиях кавитации

Продолжение табл. 1.22

1	2	3
10X18H9Л	Коррозионностойкая, жаростойкая до 750°C. Не стойкая в сернистых средах. При С-0,07% стойкая против межкристаллитной коррозии	Арматура для химической промышленности, коллекторы выхлопных систем, детали печной арматуры и др. детали, работающие до 400°C
10X18H9ТЛ	Коррозионностойкая, жаростойкая до 750°C. Жаропрочная до 600°C. Обладает высокой стойкостью против газовой и межкристаллитной коррозии	Арматура для химической промышленности, коллекторы выхлопных систем и др.
07X17H16ТЛ	Коррозионностойкая. Обладает малой магнитной восприимчивостью, высокой стойкостью против газовой и межкристаллитной коррозии, хорошо обрабатывается резанием	Детали ответственного назначения, с требованиями по малой магнитной восприимчивости, высокой коррозионной стойкости и хорошей обрабатываемости резанием
12X18H12M3ТЛ	Коррозионностойкая, жаропрочная, не подвержена межкристаллитной коррозии при температуре до 800°C	Детали, устойчивые при воздействии сернистой кислоты, фосфорной, муравьиной, уксусной и других кислот, а также детали, длительное время работающие под нагрузкой при температуре до 800°C
55X18H14C2ТЛ	Коррозионностойкая, жаростойкая до температуры 950°C. Нестойкая в среде сернистой кислоты	Те же детали, которые изготавливают из стали марки 40X24H12СЛ
15X23H18Л	Жаропрочная до 900°C. При температуре 600-800°C склонна к охрупчиванию из-за образования в структуре α -фазы	Детали установок для химической, нефтяной и автомобильной промышленности. Детали печной арматуры, не требующие высокой механической прочности
20X25H19C2Л	Коррозионностойкая, жаростойкая при температуре до 1100°C	Детали, работающие при высоких температурах
18X25H19СЛ	Коррозионностойкая, кислотоупорная, жаростойкая	Детали паровых и газовых турбин, котельных установок, лопаток, венцов компрессоров, сопловых аппаратов турбин и др. детали, работающие при высоких температурах
45X17Г13Н3ЮЛ	Коррозионностойкая, стойкая против коррозии в сернистых средах. Жаростойкая при температуре до 900°C, жаропрочная	Детали, работающие при высоких температурах. Заменитель стали марки 40X24H12СЛ
35X18H24C2Л	Коррозионностойкая, жаростойкая при температуре до 1100-1200°C, жаропрочная	Детали, работающие при высоких температурах в сильно нагруженном состоянии
31X19H9МВБТЛ	Жаропрочная	Рабочие колёса турбины turboкомпрессоров, турбинные и направляющие аппараты
12X18H12БЛ	Коррозионностойкая, жаропрочная при температуре до 650°C	Детали энергоустановок с длительным сроком работы при 600-650°C и ограниченном при 700°C
08X17H34В5Т3Ю2РЛ	Жаростойкая при температуре до 1000°C	Сопловые и рабочие лопатки газовых турбин, цельнолитые роторы и др. детали, работающие до 800°C
15X18H22В6М2РЛ 20X21H46ВВРЛ	Жаростойкая при температуре до 1000°C, жаропрочная при температуре до 800°C	Детали авиационных двигателей
110Г13Л	Высокое сопротивление износу при одновременном воздействии высокой давлений или ударных нагрузок	Детали, работающие на ударный износ
110Г13ФТЛ	Высокое сопротивление ударно-абразивному износу, высокая хладостойкость	Детали, работающие на ударный износ

Окончание табл. 1.22

1	2	3
130Г14ХМФАЛ	Высокое сопротивление износу при воздействии высоких давлений или ударных нагрузок. Высокая абразивостойкость, хладостойкость. Сохраняет высокую ударную вязкость в процессе эксплуатации деталей.	Детали, работающие на ударный износ
120Г10ФЛ	Высокое сопротивление абразивному износу	Детали, работающие в условиях абразивного износа
110Г13Х2БРЛ	Высокое сопротивление износу при одновременном воздействии высоких давлений или ударных нагрузок	Для спецпродукции

Легированные и быстрорежущие инструментальные стали. Основные свойства этих сталей – твердость и износостойкость, в связи с чем их используют исключительно для изготовления режущего инструмента (фрезы, сверла и т.п.). Химический состав некоторых легированных и быстрорежущих инструментальных сталей приведен в табл. 1.23.

Таблица 1.23

**Химический состав
легированных и быстрорежущих инструментальных сталей**

Марка стали	Содержание основных химических элементов, % (остальное – Fe)					НВ (после отжига)
	С	Mn	Si	Cr	Другие элементы	
XBG	0,9–1,05	0,8–1,1	0,15–0,35	0,9–1,2	1,2–1,6 W, Ni ≤0,35	255–207
9XBГ	0,85–0,95	0,9–1,2	0,15–0,35	0,5–0,8	0,5–0,8 W, Ni ≤0,35	241–197
9XC	0,85–0,95	0,3–0,6	1,2–1,6	0,95–1,25	Ni ≤0,35	241–197
X	0,95–1,1	0,15–0,4	0,15–0,35	1,3–1,65	Ni ≤0,35	229–187
3X2B8Ф	0,3–0,4	0,15–0,4	0,15–0,4	2,2–2,7	7,5–8,5 W; 0,2–0,5 V	255–207
P18	0,7–0,8	≤0,4	≤0,4	3,8–4,4	17,5–18,5 W; 1–1,4 V; Mo ≤0,3; Ni ≤0,4	255–205
P18K5Ф2	0,85–0,95	≤0,4	≤0,4	3,8–4,4	17–18,5 W; 1,8–2,4 V; 5–6 Co, Mo ≤0,5	261–228
P9	0,85–0,95	≤0,4	≤0,4	3,8–4,4	8,5–10 W; 2,0–2,6 V; Ni ≤0,4	269

Основным легирующим элементом в быстрорежущих сталях является вольфрам при высоком содержании углерода. Быстрорежущие стали могут быть как карбидного, так и ледебуритного класса, которые характеризуются низкой жидкотекучестью, высокой склонностью к образованию трещин и больших усадочных раковин в отливках, крайне низкой теплопроводностью (теплопроводность быстрорежущих сталей примерно втрое ниже теплопроводности углеродистых сталей). Наибольшей трудностью в процессе получения литого инструмента является получение равномерно распределенных карбидов по сечению отливки. Для решения этой задачи проводят подбор определенной скорости охлаждения отливок (способа формовки КО, начальной температуры КО до заливки и т.д.) или подбор соответствующего химического состава стали.

Магнитные сплавы на основе железа. Постоянные магниты изготавливают из магнитотвёрдых сталей (высокоуглеродистые и легированные стали) и специальных сплавов. Основным требованием, предъявляемым к постоянному магниту, является обладание наибольшим магнитным потоком между полюсами, остающимся после намагничивания магнита. Основными параметрами магнитных материалов являются: магнитная проницаемость (μ), остаточная магнитная индукция (B_r) и коэрцитивная сила (H_c). При этом магнитная энергия материала тем выше, чем больше величины B_r и H_c . Оптимальной структурой магнитотвёрдых материалов является мар-

тенсит с мелкими вкраплениями дименита или карбидов, образующихся в результате термической обработки детали. Магнитные свойства сплавы приобретают после их обработки магнитным полем. После такой обработки намагниченность ферромагнитных материалов на порядок, два или три превышает магнитную напряженность исходного магнитного поля. Магнитную твердость в сталях повышают путем легирования сверх предела растворимости (для создания второй фазы в структуре сплава) увеличением дисперсности второй фазы вследствие измельчения зерна, наклепа и т. п. То есть все мероприятия, направленные на создание напряжений в кристаллической решетке материала, повышают его магнитную твердость.

Магниты, изготовленные из сталей У10...У12, приобретают магнитные свойства после закалки на мартенсит, в результате возникновения напряжений в кристаллической решетке. Однако в связи с низкой прокаливаемостью и склонностью к старению магниты из высокоуглеродистых сталей склонны к потере своих магнитных свойств в процессе определенного времени.

Стали, легированные W, Co и Cr, при термической обработке прокаливаются значительно лучше высокоуглеродистых, обладают аналогичными магнитными свойствами ($B_r=0,8...1,0$ Тл, $H_c=4640...13600$ А/м), которые более стабильны во времени. Наибольшими магнитными свойствами ($B_r=0,4...1,23$, $H_c=20000...52000$ А/м) обладают низкоуглеродистые сплавы системы Fe-Ni-Al с добавками меди или кобальта, или с комплексной добавкой меди и кобальта.

Магнитные стали и сплавы обладают высокой твердостью и хрупкостью, практически не поддаются обработке резанием. Магнитные свойства магнитотвердых сплавов весьма чувствительны к чистоте металла и химическому составу. В связи с этим в магнитных сплавах содержание примесей строго ограничено. Наиболее чувствительны магнитные свойства сплавов к содержанию углерода.

Маркировка магнитных сплавов на основе железа. В обозначении марок магнитных сплавов буквы обозначают: Ю – алюминий, Б – ниобий, Д – медь, К – кобальт, Н – никель, С – кремний, Т – титан, А – столбчатая кристаллическая макроструктура, АА – монокристаллическая макроструктура.

Цифры в марке сплава указывают на содержание химического элемента в сплаве, в % (по массе). Химический состав некоторых литейных магнитных сплавов на основе железа приведен в табл. 1.24.

Таблица 1.24

Химический состав литейных магнитных сплавов на основе железа (ГОСТ 17809-72)

Марка сплава	Содержание основных химических элементов, % (остальное – Fe)									
	Al	Ni	Cu	Co	Ti	Nb	Si	TKC	MA	
ЮНД4	13-14	24-25	3-4	-	0,2-0,3	-	-	-	-	-
ЮНД8	10,6-11,3	28-28,4	7,8-8,2	-	-	-	-	-	-	-
ЮНТС	13-16	32-35	-	-	0,4-0,5	-	1,0-1,5	-	-	-
ЮНДК15	8,5-9,5	19-20	3-4	14-15	0,2-0,3	-	-	-	-	-
ЮНДК18	9-10	18-19	3-4	18-19	-	-	-	-	-	-
ЮНДК18С	6,5-7,5	14-15	1,5-2,0	18-20	-	-	0,5-0,8	-	-	-
ЮН13ДК24С	7,5-8	12-13	2-2,5	23,5-24,5	-	-	0,15-0,25	-	-	-
ЮН13ДК24	7,5-8,5	12,5-13,5	2,5-3,5	23,5-24,5	-	-	-	-	-	-
ЮН14ДК24	7,5-8,5	13,5-14,5	2,5-3,5	23,5-24,5	-	-	-	-	-	-
ЮН15ДК24	7,5-8,5	14,5-15,5	2,5-3,5	23,5-24,5	-	-	-	-	-	-
ЮН13ДК25А	7,5-8	12,5-13,5	3-3,5	24-26	-	-	-	-	-	-
ЮН14ДК25А	8-8,5	13,5-14,5	3,5-4	24-26	0,2-0,3	-	-	-	-	-
ЮН13ДК25БА	7,7-8,1	12,5-13	3-3,5	24-26	-	0,5-0,8	0,3-0,6	-	-	-

Окончание таблицы 1.24									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЮН14ДК25БА	8-8,5	13,5-14	3,5-4	24-26	0,2-0,3	0,8-1	-	-	-
ЮН15ДК25БА	8,3-8,7	14,5-15	4-4,5	24-26	0,2-0,3	1-1,4	-	-	С
ЮНДК34Т5	6,8-7,2	14-14,5	3-4	34-35	5-5,5	-	-	-	-
ЮНДК35Т5Б	6,8-7,2	14-15	3-4	34-35	5-5,5	0,8-1,1	-	-	Р
ЮНДК35Т5	6,8-7,2	14-14,5	3,3-3,7	34,5-35,5	5-5,5	-	-	-	-
ЮНДК35Т5БА	6,8-7,2	14-14,5	3,3-3,7	34,5-35,5	4-5	0,9-1,1	-	-	С
ЮНДК35Т5АА	7-7,5	14-14,5	2,5-3	34,5-35,5	5-5,5	-	-	-	М
ЮНДК38Т7	6,9-7,3	13,5-14	3,3-3,7	38-40	6,9-7,2	-	-	-	Р
ЮНДК40Т8АА	7,2-7,7	14-14,5	3-4	39-40	7-8	-	-	-	М
ЮНДК40Т8	7,5-8,5	13,5-14,5	3-4	40-42	8-9	-	-	-	Р

Примечание. Макроструктура отливки: Р – равноосная, С – столбчатая, М – монокристаллическая. ТКС – тип кристаллической макроструктуры. МА – магнитная анизотропия.

Значения магнитных параметров сплавов и размеры образцов, на которых оценивают магнитные свойства сплавов (ГОСТ 17809-72), приведены в табл. 1.25.

Таблица 1.25

Значения магнитных параметров сплавов и размеры образцов

Марка сплава	Максимальное произведение $(B_H)_{max}$, кДж/м ³	Коэффициентная сила по индукции $H_{св}$, кА/м	Остаточная индукция B_r , Тл	Размеры образцов, мм	
				Сторона прямогоугольника или диаметр поперечного сечения	Длина
ЮНД4	7,2	40	0,50	не более	
ЮНД8	10,2	44	0,60	30	100
ЮНТС	8	58	0,43		
ЮНДК15	12	48	0,75		
ЮНДК18	19,4	55	0,90		
ЮНДК18С	28	44	1,10	40	150
ЮН13ДК24С	36	36	1,30		
ЮН13ДК24	36	40	1,25		
ЮН14ДК24	36	48	1,20		
ЮН15ДК24	36	52	1,15		
ЮН13ДК25А	56	44	1,40		
ЮН14ДК25А	56	52	1,35		
ЮН13ДК25БА	56	48	1,40		
ЮН14ДК25БА	56	58	1,30		
ЮН15ДК25БА	56	62	1,25		
ЮНДК34Т5	28	92	0,75	40	100
ЮНДК35Т5Б	32	96	0,75		
ЮНДК35Т5	36	110	0,75		
ЮНДК35Т5БА	72	110	1,02		
ЮНДК35Т5АА	80	115	1,05	15	60
ЮНДК38Т7	36	135	0,75		
ЮНДК40Т8АА	36	145	0,70		
ЮНДК40Т8	64	145	0,90		

В соответствии с ГОСТ 17809-72, все литые детали (магниты) подвергают определенной термической обработке. Режимы термической обработки литых деталей, изготовленных из магнитных сплавов, приведены в табл. 1.26.

Режимы термической обработки магнитных сплавов (ГОСТ 17809-72)

Режим термической обработки	
Марка сплава	Режим термической обработки
ЮНД4	Охлаждение с температуры 1250°C со скоростью 180-300°C/мин
ЮДНК8	Охлаждение с температуры 1270°C в масле, отпуск 600°C – 2 ч
ЮНТС	Охлаждение с температуры 1200°C на воздухе
ЮНДК15	Охлаждение с температуры 1280°C до 700°C со скоростью 60-300°C/мин, отпуск: 650°C – 1 ч, 590°C – 2 ч
ЮНДК18, ЮНДК18С ЮН13ДК24С, Н13ДК24, ЮН14ДК24, ЮН15ДК24	Охлаждение с температуры 1280°C в магнитном поле напряженностью не менее 160 кА/м до 600°C со скоростью 50–200°C/мин. Отпуск 620°C – 2 ч, 590°C – 8 ч
ЮН15ДК25А ЮН14ДК25А ЮН13ДК25БА ЮН14ДК25БА ЮН15ДК25БА	Охлаждение с температуры 1280°C в магнитном поле напряженностью не менее 160 кА/м до 900°C со скоростью 200°C/мин и до 600°C со скоростью 25°C/мин. Отпуск: 610°C – 5 ч, 590°C – 8 ч, 560°C – 12 ч
ЮНДК34Т5 ЮНДК35Т5Б	Охлаждение с температуры 1250°C в магнитном поле напряженностью не менее 200 кА/м до 900°C со скоростью 200°C/мин и до 600°C со скоростью 20–40°C/мин. Отпуск: 640°C – 2 ч, 500°C – 8 ч
ЮНДК35Т5 ЮНДК35Т5БА ЮНДК35Т5АА	Охлаждение с температуры 1280°C до 800°C со скоростью не менее 150°C/мин и выдержка в изотермической ванне при 795°C плюс 5°C, в течение 10 мин, в магнитном поле напряженностью не менее 240 кА/м, отпуск 640°C – 5 ч, 560°C – 20 ч
ЮНДК38Т7	Охлаждение с температуры 1230°C до 900°C со скоростью не менее 250°C/мин и выдержка в изотермической ванне при 815±5 °C в течение 10-15 мин, в магнитном поле напряженностью не менее 280 кА/м, отпуск: 675°C – 0,5 ч.; 650°C – 2 ч, 580°C – 16 ч, 550°C – 20 ч
ЮНДК40Т8	Охлаждение с температуры 1210°C до 900°C со скоростью не менее 250°C/мин и выдержка в изотермической ванне при 830°C в течение 10–15 мин, в магнитном поле напряженностью не менее 280 кА/м, отпуск: 675°C – 0,5 ч.; 650°C – 2 ч, 590°C – 16 ч, 550°C – 20 ч

Чугун. Как было отмечено выше, чугунами называют железоуглеродистые сплавы, содержащие, по массе, от 2,14% до 6,67% углерода (см. рис. 1.1).

Чугуны классифицируют:

- 1) по состоянию углерода в чугуне, который может находиться в виде самостоятельной фазы или связанным в химическое соединение – графитизированный чугун (серый чугун, чугун с вермикулярным графитом, высокопрочный чугун с шаровидным графитом), половинчатый и отбеленный (белый) чугун;
- 2) по виду высокоуглеродистой фазы, сформировавшейся в процессе кристаллизации или термической обработки чугуна (по форме графитовых включений, наблюдаемых на срезе чугунного образца): серый чугун с пластинчатым графитом (СЧ), чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ), высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧ), ковкий чугун с хлопьевидным графитом (КЧ).
- 3) по типу структуры металлической основы чугуна (матрицы): ферритный, перлитный, мартенситный, аустенитный, феррито-перлитный и перлито-карбидный
- 4) по химическому составу: чугуны нелегированные (общего назначения) и чугуны легированные (специального назначения).

Кроме того, чугуны классифицируют по типу плавильной установки, в которой их выплавляли (доменные, ваграночные и т.п.), типу используемой шихты и пр.

Классификацию структуры чугуна, как по форме графита, так и по матрице, проводят в соответствии с ГОСТ 3443-77. При оценке графита в чугуне, согласно ГОСТ 3443-77, определяют форму, характер распределения, количество и размеры графитовых включений. При оценке матрицы определяют тип структуры, количество перлита и феррита, дисперсность перлита, строение, распределение, размер ячеек

сетки и отдельных включений фосфидной эвтектики, количество и размер включений цементита и ледебурита.

Фосфидная эвтектика в чугуне образуется вследствие присутствия в нём фосфора. Фосфидная эвтектика улучшает жидкотекучесть чугуна и, будучи очень твердой структурной составляющей, также повышает его твердость и износостойкость. Тем не менее, при значительном количестве в структуре чугуна фосфидной эвтектики увеличивается его хрупкость и затрудняется обработка резанием.

Методом литья по выплавляемым моделям преимущественно, изготавливают отливки из серого чугуна с пластинчатым (см. ГОСТ1412-85) и шаровидным графитом (см. ГОСТ 7293-85). Значительно реже для изготовления отливок используют антифрикционные чугуны (см. ГОСТ 1585-85) и легированные чугуны со специальными свойствами (см. ГОСТ 7769-82). Общие технические условия на отливки из чугуна изложены в ГОСТ 26358-84.

Графитизированный чугун. К числу графитизированных чугунов относят серый чугун (чугун с пластинчатой формой графита), а также чугун с вермикулярной и шаровидной формами графита.

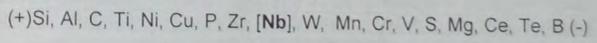
Серый чугун маркируют буквами СЧ, за которыми следует число, обозначающее минимальное значение временного сопротивления при растяжении в МПа · 10¹.

ГОСТ 1412–85 включает шесть основных марок серого чугуна: СЧ10, СЧ15, СЧ20, СЧ25, СЧ30 и СЧ35. По требованию потребителя, для изготовления отливок допускаются марки чугуна СЧ18, СЧ21, СЧ24.

В сером чугуне, как конструкционном материале, в зависимости от требуемых свойств, доминирующим фактором становится либо графит, либо его металлическая матрица. Поэтому основным процессом, предопределяющим структуру СЧ и, следовательно, его механические и эксплуатационные свойства, является процесс графитизации.

Графитизацией называют процесс выделения графита в виде самостоятельной фазы при кристаллизации или охлаждении чугуна. Графит может образовываться как из жидкой фазы, при кристаллизации, так и из твердой фазы. В соответствии с диаграммой Fe–C (см. рис. 1.1) ниже линии CD' образуется первичный графит, по линии E'CF' – эвтектический графит, по линии ES' – вторичный графит и по линии P'S'K' – эвтектоидный графит.

Графитизация чугуна и полнота прохождения этого процесса зависят от скорости охлаждения чугуна (чугунной отливки), его химического состава и наличия центров графитизации. По степени влияния на графитизацию чугуна химические элементы можно расположить в следующий ряд [271]:



Элементы, расположенные слева от ниобия, относятся к графитизаторам, соответственно, элементы, расположенные справа от ниобия – способствуют образованию отбела в чугуне (антиграфитизаторы). При этом чем дальше от ниобия (в приведенном ряду) расположен элемент, тем выше степень его воздействия как графитизатора или антиграфитизатора соответственно.

Количественное влияние элементов в чугуне на процесс графитизации оценивают теоретически по абсолютной величине констант графитизации [59]:

$$K'_f = C[\text{Si}-0,2(\text{Mn}-1,7\text{S}-0,3)+0,1\text{P}+0,4\text{Ni}-1,2\text{Cr}+0,5\text{Al}+0,2\text{Cu}+0,4\text{Ti}-0,4\text{Mo}-2\text{V}-8\text{Mg}] \quad (1.10)$$

при эвтектическом превращении или

$$K_{\text{II}}^{\text{II}} = C[\text{Si}+0,2(\text{Mn}-1,7\text{S}-0,3)\text{P}+0,25\text{Ni}+1,2(\text{Cr}+\text{Mo})+0,8\text{Cu}+4\text{V}-8\text{Sn}] \quad (1.11)$$

при эвтектичном превращении, где содержание элементов в чугуне указано в % (по массе).

Используя уравнения (1.10) и (1.11) и располагая определённым набором шихтовых материалов, можно рассчитать количество дополнительно вводимых в чугун химических элементов, необходимых для изменения графитизации с целью сохранения (получения) той или иной структуры чугуна.

В составе СЧ важнейшими химическими элементами, определяющими его структуру и свойства, являются углерод и кремний. В связи с этим в качестве характеристики чугунов приняты показатели углеродного эквивалента чугуна ($C_{\text{Э}}$) и эвтектичности чугуна ($S_{\text{Э}}$), отражающие влияние химического состава чугуна на его положение относительно эвтектической концентрации углерода в железе (точка С на диаграмме Fe-C):

$$C_{\text{Э}} = C+0,3\text{Si}+0,33\text{P}+0,4\text{S}-0,03\text{Mn}, \quad (1.12)$$

$$S_{\text{Э}} = \frac{C}{4,26-0,3\text{Si}-0,33\text{P}-0,4\text{S}+0,03\text{Mn}}, \quad (1.13)$$

где содержание химических элементов в чугуне указано в % (по массе).

Соответственно чугун считается доэвтектическим, если $C_{\text{Э}} < 4,26\%$ и $S_{\text{Э}} < 1$, эвтектическим, если $C_{\text{Э}} = 4,26\%$ и $S_{\text{Э}} = 1$, заэвтектическим, если $C_{\text{Э}} > 4,26\%$ и $S_{\text{Э}} > 1$.

Химический состав (ГОСТ 1412-85), механические свойства, плотность при 20°C и величина свободной линейной усадки серого чугуна с пластинчатым графитом приведены в табл. 1.27.

Таблица 1.27

Химический состав и механические свойства серого чугуна с пластинчатым графитом

Марка чугуна	Массовая доля элементов, % (остальное – Fe)					Механические свойства			ρ_1 , кг/м ³	α_1 , %
	C	Si	Mn	P	S	$\sigma_{\text{в}}$	$\sigma_{\text{и}}$	HB		
				не более		МПа				
Заэвтектические чугуны										
СЧ10	3,5–3,7	2,2–2,6	0,5–0,8	0,3	0,15	100	274	1430–2290	6800	1,0
СЧ15	3,5–3,7	2,0–2,4	0,5–0,6	0,2	0,15	150	314	1630–2290	7000	1,1
Доэвтектические чугуны										
СЧ20	3,3–3,5	1,4–2,4	0,7–1,0	0,2	0,15	200	392	1700–2410	7100	1,2
СЧ25	3,2–3,4	1,4–2,2	0,7–1,0	0,2	0,15	250	451	1800–2500	7200	1,2
СЧ30	3,0–3,2	1,3–1,9	0,7–1,0	0,2	0,12	300	490	1810–2550	7300	1,3
СЧ35	2,9–3,0	1,2–1,5	0,7–1,1	0,2	0,12	350	539	1970–2690	7400	1,3

Примечание. Допускается низкое легирование чугуна различными элементами (хромом, никелем, медью, фосфором и др.).

Анализ данных, приведенных в табл. 1.27, показывает, что при снижении эвтектичности чугуна с 1,1 до 0,79 (при суммарном понижении углерода и кремния, с некоторым повышением содержания марганца) возрастает прочность и твердость серого чугуна. В чугунах марок СЧ40 и СЧ45 повышение механических свойств обеспечивается за счет низкого содержания серы и фосфора. Следует отметить, что с повышением механических свойств серых чугунов, указанных в ГОСТ 1412-85, за

исключением демпфирующей способности, также возрастают модуль упругости, модуль сдвига и предел прочности при сжатии.

В основном уровень механических свойств чугуна определяется соотношением его структурных составляющих: феррита, перлита и графита. Кроме того, существенное влияние на механические свойства чугуна оказывают количество, форма, размеры и характер распределения графита в металлической матрице.

То есть для обеспечения высокой прочности чугуна (основного показателя чугуна как конструкционного материала) необходимо создать такие условия, в результате которых в структуре чугуна:

- содержание феррита минимально;
- перлит имеет наибольшую дисперсность;
- отсутствует структурно — свободный цементит;
- содержание графита минимально;
- размеры графитовых включений минимальны;
- форма графитовых включений максимально приближена к шаровидной.

Помимо химического состава, на структуру чугуна весьма существенное влияние оказывают: природа используемых шихтовых материалов, условия плавки, температура выпуска металла из печи, начальная температура КО, скорость продвижения фронта кристаллизации в стенках отливки (скорость затвердевания отливки) и т.п.

Из перечисленных факторов наиболее заметное влияние на структуру чугуна оказывает скорость затвердевания отливки. При достаточно высокой скорости затвердевания (при интенсивном теплоотводе от отливки в процессе её затвердевания) наиболее тонкие стенки отливки или их кромки могут быть получены с отбелом, что является браковочным признаком для отливок из серого чугуна.

СЧ с перлитной матрицей и мелкими, равномерно распределёнными в матрице, графитовыми включениями, используют для изготовления износостойких высокопрочных литых деталей ответственного назначения. Отливки, не испытывающие больших нагрузок, изготавливают из перлитно-ферритных чугунов. Ферритный чугун применяют для изготовления неотвечественных отливок.

Несомненным достоинством чугуна является его высокая циклическая вязкость и низкая чувствительность к внешним надрезам, что делает его незаменимым конструкционным материалом для отливок, работающих в условиях знакопеременных нагрузок и вибраций. В этом отношении наиболее широкое распространение для изготовления наиболее сложных и ответственных литых деталей получили доэвтектические чугуны.

СЧ обладают высокими литейными свойствами, которые повышаются с увеличением температуры перегрева и степени их эвтектичности (увеличением содержания в чугуне углерода и кремния). В некоторых случаях для повышения жидкотекучести в чугун дополнительно вводят фосфор, который при этом заметно понижает трещиностойкость чугуна.

Усадка серого чугуна относительно других сплавов невысока и, в основном, определяется протеканием двух процессов, сопровождающих охлаждение отливки, — уменьшением объёма металлической основы сплава и одновременным увеличением её объёма за счет развития процесса графитизации.

В ряде случаев чугунные отливки контролируют на герметичность — показатель наличия несплошностей в стенках отливки. В этом случае для получения чугунных отливок с минимальной пористостью и рыхлотой необходимо максимально снизить в чугуне содержание фосфора, мышьяка и других элементов, образующих в чугуне легкоплавкие эвтектики.

СЧ характеризуется низким сопротивлением отрыву, практически полным отсутствием относительного удлинения и весьма низкой ударной вязкостью (хрупкостью).

Коррозионная стойкость СЧ невысока, но повышается по мере измельчения графита и уменьшения его количества, а также при получении чугуна с однофазной матрицей, при снижении содержания в чугуне кремния, фосфора и серы. Для повышения коррозионной стойкости СЧ модифицируют или в их состав вводят: до 1,4% Cu, до 1% Cr и т.п.

Для повышения окалиностойкости и ростоустойчивости в СЧ измельчают и уменьшают количество графита, размер эвтектического зерна, заменяют перлит ферритом. В воздушной среде СЧ сохраняет повышенную стойкость до 450...500°C, в среде лечных газов – до 350°C. Свариваемость СЧ значительно хуже, чем углеродистой стали. Обрабатываемость резанием СЧ зависит от его твердости. Чем выше твердость СЧ, тем хуже его обрабатываемость.

Как правило, СЧ присуща пластинчатая форма графита. Для повышения прочности и теплопроводности чугуна, а также придания ему малой чувствительности к изменению прочностных характеристик от толщины стенки отливки, расплав чугуна обрабатывают модифицирующими лигатурами, содержащими иттрий, церий и другие РЗМ. В результате модифицирования при содержании в чугуне РЗМ в количестве 0,05...0,15% (по массе) графит приобретает более компактную форму, занимающую среднее положение между пластинчатой и шаровидной. Такой чугун называют чугуном с вермикулярным графитом (ЧВГ. См. ГОСТ 28394-89).

Модификаторы инокулирующего действия (ферросилиций, силикокальций, С, Al, сплавы титана, циркония, некоторых лантаноидов, бария, стронция) понижают в чугуне содержание Si и С без появления отбела в поверхностном слое отливки, а также измельчают графит. В результате этого в структуре серого чугуна увеличивается относительная доля перлита и, соответственно, повышаются механические свойства чугуна. К числу химических элементов, стимулирующих образование перлита в структуре чугуна, также относятся Sn, Pb, P, Sb, N и другие модификаторы. Введение в расплав чугуна данных химических элементов способствует получению так называемых перлитных серых чугунов. В то же время введение Вi и повышение содержания S в чугуне резко отбеливает чугун.

В результате ввода в чугун перед разливкой определённого количества магния, иттрия, церия и других лантаноидов в затвердевающем чугуне графит приобретает шаровидную форму или форму, близкую к шаровидной. Этот процесс, применительно к чугунам, называют модифицированием. Шаровидная форма графита в меньшей степени, чем форма пластинчатая, ослабляет сечение металлической матрицы чугуна, поскольку не является таким сильным концентратором напряжений. Это обстоятельство, в сочетании с возможностью формировать необходимую структуру металлической матрицы, позволяет придавать чугунам высокую прочность, пластичность и повышенную ударную вязкость.

Серые чугуны с шаровидным графитом называют высокопрочными и, в соответствии с ГОСТ 7293-85, маркируют буквами ВЧ, за которыми следует число, указывающее минимальное значение временного сопротивления при растяжении в МПа · 10⁻¹ (например, ВЧ50). Таким образом, высокопрочным называют чугун с шаровидной (сферической) формой графита. Шаровидную форму графит приобретает в результате обработки жидкого чугуна сфероидизирующими модификаторами – Mg, Ce, Y, La, Ca, Li и др.

ВЧ обладают уровнем механических свойств, сравнимым со сталями. В сравнении с СЧ, ВЧ чугуны имеют более высокий модуль упругости, а циклическая вязкость высокопрочного чугуна в 2...4 раза ниже, чем у СЧ. Как и у других типов чугунов, матрица у ВЧ может быть ферритной, перлитно-ферритной или перлитной. Химический состав и механические свойства высокопрочных чугунов с шаровидным графитом регламентированы ГОСТ 7293-85 и приведены в табл. 1.28.

Таблица 1.28
Механические свойства и рекомендуемый химический состав высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (для отливок с толщиной стенок до 50 мм)

Марка	Массовая доля элементов, % (остальное – Fe)			Механические свойства			
	C	Si	Mn	σв, МПа	σт, МПа	δ, %	НВ
Ферритный чугун							
ВЧ35	3,3–3,8	1,9–2,9	0,2–0,6	350	220	22	140–170
ВЧ40				400	250	15	140–202
Перлитно-ферритный чугун							
ВЧ45	3,3–3,8	1,9–2,9	0,3–0,7	450	310	10	140–225
ВЧ50				500	320	7	153–245
Перлитный чугун							
ВЧ60	3,2–3,6	2,4–2,6	0,4–0,7	600	370	3	192–277
ВЧ70				700	420	2	228–302
ВЧ80				800	480	2	248–351
Бейнитный чугун							
ВЧ 100	3,2–3,6	3,0–3,8	0,4–0,7	1000	700	2	270–360

Примечание. Чугун марки ВЧ35 с шаровидным графитом должен иметь среднее значение ударной вязкости KCV не менее 21 Дж/см² при температуре 20°C и 15 Дж/см² при температуре –40°C, минимальное значение ударной вязкости должно быть не менее 17 Дж/см² при температуре 20°C и 11 Дж/см² при температуре –40°C. Чугун марки ВЧ35 и ВЧ40 с вермикулярным графитом должен иметь относительное удлинение δ ≥ 1,0%.

Таблица 1.29
Массовая доля примесей
в высокопрочном чугуне

Марка	Содержание, % (не более)					
	P	S	Cr	Cu	Ni	
ВЧ35	0,1	0,02	0,05	-	-	
ВЧ40			0,10	-	-	
ВЧ45			0,10	-	-	
ВЧ50		0,015	0,15	0,6	0,3	0,4
ВЧ60					0,4	0,6
ВЧ70					0,6	0,6
ВЧ80					0,6	0,6
ВЧ100	0,10		0,6	0,8		

Допустимая массовая доля примесей в высокопрочном чугуне приведена в табл. 1.29.

Высокопрочные ферритные и перлитно-ферритные чугуны с шаровидным графитом и указанными в табл. 1.28 свойствами получают в литом состоянии без термообработки. В перлитных и бейнитных чугунах указанные свойства достигаются путём ввода добавок 0,1% Cr, 0,4% Cu, 0,8% Ni, с последующей термообработкой (нормализацией – для перлитных чугунов и закалкой с отпуском – для бейнитных чугунов).

Жидкотекучесть ВЧ аналогична жидкотекучести СЧ и повышается с увеличением содержания С и Si в чугуне (увеличение эвтектичности ВЧ от 3 до 5 повышает относительную жидкотекучесть ВЧ в 2,8...3,1 раза). Свободная линейная усадка ВЧ, обработанного Mg, составляет 0,5...1,2% и возрастает до 1,7% при наличии в структуре чугуна структурно-свободного цемента. ВЧ не склонен к образованию горячих трещин, но склонен к образованию усадочных дефектов, значительных литейных напряжений и холодных трещин. Для снятия внутренних напряжений в некоторых случаях отливки из ВЧ отжигают при 550°C, в течение двух-трёх часов. В тонких стенках отливок ВЧ склонны к отбелу.

Наиболее радикальными мерами, предупреждающими отбел в тонкостенных отливках или тонких кромках отливок, является либо повышение суммарного содержания в чугуне (%C+%Si) до 7%, либо получение отливок в КО, заформованные в опорный наполнитель и нагретые до 800...1200°C.

ВЧ обладает высокой износостойкостью, низким коэффициентом трения, высокой теплопроводностью, обрабатываемостью и прирабатываемостью.

Отливки из ВЧ применяют в различных областях техники, например, в насосных, гидравлических и газовых установках. ВЧ с шаровидным графитом и ферритной или перлитно-ферритной матрицей используют для получения деталей с повышенной пластичностью, работающих в условиях высоких нагрузок. Отливки из ВЧ с перлитной или бейнитной матрицей работают в условиях очень высоких нагрузок и износа.

Модифицирование чугуна. Поэтому для конструкционных чугунов наиболее важными являются форма, количество, размер и характер распределения графитовых включений в металлической матрице. В обычном сером чугуне графит имеет вид розеток с крупными лепестками, которые, для металлической матрицы практически являются микротрещинами, что и предопределяет относительно невысокие механические свойства чугуна.

При механическом или термическом нагружении чугунного образца наибольшее местное повышение растягивающих напряжений в металлической матрице возникает в торцевых областях лепестков графита. При этом наибольшую величину местных растягивающих напряжений определяют по известной формуле:

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r_r}} \quad (1.14)$$

где K – константа материала (коэффициент интенсивности напряжений); r_r – радиус закругления торцов графитового включения (см. рис. 1.5, а, б).

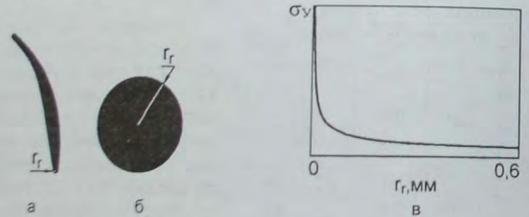


Рис. 1.5. Вид графитового включения на шлифе С4 (а), В4 (б) и зависимость величины местных растягивающих напряжений в чугуне от величины r_r (в)

Анализ формулы (1.14) показывает, что с увеличением радиуса закругления торцов графитовых включений, величина местных растягивающих напряжений в металлической матрице чугуна уменьшается (см. рис. 1.5, в). Следовательно, при всех прочих равных условиях, с увеличением r_r величины прочностных показателей чугуна повышаются.

Естественно, что любое конфигурационное изменение графитовых включений чугуна непременно сказывается на его механических свойствах. Например, изменение формы графита с пластинчатой (см. рис. 1.5, а) на шаровидную (см. рис. 1.5, б), позволяет более чем вдвое увеличить предел прочности чугуна, а показатель удлинения – более чем в десять раз. Поэтому модифицирование чугуна с целью придания графитовым включениям компактной формы является одной из важнейших технологических операций в производстве чугунного литья.

В цехах литья по выплавляемым моделям наиболее распространенным методом воздействия на структуру чугуна является модифицирование расплава графитизирующими или стабилизирующими модификаторами.

Модифицирующее воздействие элементов в жидком чугуне ограничено во времени и, как правило, достигает максимума через 10...12 мин с момента ввода в фракции 1...6 мм вводят в ковш или в тигель плавильной печи непосредственно перед всплеском металла.

Модифицирование стабилизирующими модификаторами используют преимущественно для чугунов с высокой степенью эвтектичности, для измельчения графитовых включений и уменьшения их количества, формирования определенной перлитной основы. При этом стабилизирующие модификаторы, как правило, содержат марганец, медь, хром, олово, сурьму и др.

Графитизирующие модификаторы используют для модифицирования доэвтектических чугунов с целью уменьшения размеров лепестков графита, устранения междендритных выделений графита и склонности чугуна к отбелу. В качестве графитизирующих модификаторов используют порошок серебристого графита (0,05...0,10%), ферросилиций (0,3...0,8%), силикокальций, алюминий, комплексные модификаторы на основе кремния с марганцем, кальцием, магнием, цирконием, стронцием, барием (0,3...1,0%) или их смесями с графитом (0,1...1%).

Прочность модифицированных чугунов заметно повышается с понижением эвтектичности чугуна, при одновременном снижении в чугуне углерода и кремния, повышением содержания марганца (до 1...1,5%) и повышением температуры перегрева расплава чугуна.

Помимо указанных мероприятий благотворное влияние на механические свойства чугуна оказывает использование в шихте 50...70% стального лома. Механизм влияния стального лома на прочностные свойства чугуна реализуется через увеличение дисперсности графита.

Графитизирующее модифицирование улучшает не только механические свойства доэвтектических чугунов ($S_3 = 0,65...0,85$), но и их относительно невысокие литейные свойства. В связи с этим графитизирующее модифицирование для доэвтектических чугунов, при получении тонкостенных отливок, является обязательной технологической операцией. Обязательным является и модифицирование чугунов близких к эвтектическому составу ($S_3 = 0,85...0,98$) – в случае получения тонкостенных или разностенных отливок.

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом, в основном, получают путём присадки в расплав чугуна магния, церия или иттрия. При этом состав чугуна должен быть близким к эвтектическому ($C_3 = 4,0...4,4\%$).

К числу высокопрочных чугунов также относят и чугун с вермикулярным графитом, в котором включения графита представляют собой более компактные, чем пластинчатый графит, включения с округлёнными торцами.

Чугун с вермикулярным графитом получают путём обработки его расплава магниевыми, титановыми, цериевыми, иттриевыми или кальциевыми лигатурами. При этом обязательным условием получения графита компактной формы (шаровидной или вермикулярной) является низкое содержание серы и фосфора (до 0,1...0,15%) в чугуне.

Немаловажную роль в формировании структуры чугуна и, соответственно, его свойств оказывают и другие химические элементы, входящие в состав чугуна.

Описание влияния химических элементов на свойства чугунов [40; 125; 271; 275 и др.] приведено в табл. 1.30.

Влияние химических элементов на свойства чугунов Таблица 1.30

Элемент	Серый чугун	Высокопрочный чугун
1	2	3
C	Увеличение содержания уменьшает прочность и твёрдость, увеличивает пластичность и литейные свойства чугуна.	Улучшает литейные свойства чугуна.
Si	Графитизатор. Понижает прочностные свойства чугуна, обеспечивает получение ферритной или феррито-перлитной структуры, увеличивает дисперсность перлита, снижает твёрдость и усадку. Повышенное содержание кремния понижает пластичность и несколько повышает твёрдость.	До определённого количества повышает предел прочности при растяжении. Дальнейшее повышение содержания понижает предел прочности при растяжении и относительное удлинение.
Mn	Антиграфитизатор, десульфуратор, способствует отбелу. При повышении содержания до 0,7–1,5% повышает механические свойства чугуна за счёт увеличения дисперсности перлита. Дальнейшее увеличение содержания Mn приводит к снижению механических свойств. Увеличивает усадку.	При увеличении содержания до 1,0–1,3%, за счёт повышения доли перлита в структуре, увеличивает износостойкость, уменьшает относительное удлинение и повышает предел прочности.
S	Понижает жидкотекучесть (особенно заметно при S>0,12–0,14%), прочность и пластичность, повышает износостойкость, способствует появлению отбела, придаёт чугуну красноломкость, уменьшает размеры эвтектических зёрен.	Блокирует процесс сфероидизации графита, в связи с чем понижает механические свойства чугуна.
P	Повышает жидкотекучесть. Влияние на графитизацию – незначительно. Уменьшает размеры эвтектических зёрен, придаёт чугуну хрупкость.	Существенно влияет на структуру и свойства чугуна. Для получения чугуна с высокими пластическими свойствами содержание фосфора в чугуне ограничивают 0,08%.
Cr	При содержании более 0,8% понижает прочность, повышает хрупкость, твёрдость, сопротивление износу, коррозии в морской воде и слабых растворах кислот, повышает дисперсность перлита, сильный карбидообразователь, замедляет процесс графитизации углерода.	До определённого предела повышает жаростойкость, окислительную и износостойкость.
Ni	Легировующий элемент. Способствует процессу графитизации, повышает коррозионную стойкость в морской воде и щелочах, повышает дисперсность перлита, улучшает обрабатываемость чугуна, выравнивает уровень механических свойств в стенках отливок различной толщины.	Увеличивает жаростойкость, коррозионностойкость, теплопроводность.
Cu	Способствует графитизации и уменьшает твёрдость при содержании до 4%. Дальнейшее повышение содержания меди увеличивает твёрдость и прочность, способствует получению однородной структуры в стенках отливок разной толщины. Увеличивает коррозионную стойкость в атмосферных условиях, в растворах солей, кислот, нефти.	Значительно повышает механические свойства при содержании 1–2%. При содержании более 2% препятствует процессу сфероидизации графита. Улучшает обрабатываемость и прокаливаемость, повышает дисперсность перлита, измельчает дендриты аустенита.
Ti	Раскислитель. Способствует равномерному выделению графита в металлической матрице. При содержании более 0,18% препятствует процессу графитизации. Повышает дисперсность перлита, измельчает эвтектическое зерно.	Блокирует процесс сфероидизации графита.

1	2	Окончание табл. 1.30
		3
Mo	Легировующий элемент. Повышает дисперсность перлита и дендритов аустенита, препятствует процессу графитизации и способствует карбидообразованию. Значительно повышает жаропрочность, повышает прочность и твёрдость доэвтектических чугунов без ухудшения обрабатываемости, повышает сопротивление износу, улучшает кратковременную прочность при высоких температурах, теплостойкость, ростоустойчивость, сопротивление износу, ударную вязкость.	-
Mg	-	В совокупности с церием используется для сфероидизации графита. Оптимальное остаточное содержание 0,04–0,08% при остаточном содержании Ce≥0,02%.
W, V	Увеличивают механические свойства за счёт измельчения перлита и дендритов аустенита.	-
Sn	-	При содержании более 0,13% препятствует процессу сфероидизации графита.

Чугуны легированные, со специальными свойствами. Повышение прочности чугуна и придание ему специальных свойств связано с легированием. Для легирования СЧ используют достаточно большое количество химических элементов, влияние которых на структуру чугуна позволяет объединить их в следующие группы:

- Cr (до 0,8%), Mn, Ni, Mo, Cu, V – повышают прочность чугуна за счёт сокращения в структуре доли феррита и увеличения дисперсности перлита;
- V, Mo, Cr (до 0,8%) – наиболее значительно повышают прочность чугуна за счёт измельчения графита;
- Ni, Cu, Ti – предотвращают отбеливание чугуна в тонкостенных отливках;
- V, Cr, Mn, Mo – увеличивают склонность чугуна к отбелу.

Маркировка специальных чугунов. В марках специальных чугунов буквы обозначают: Ч – чугун, С – кремний, Н – никель, Х – хром, Т – титан, М – молибден, Д – медь, Г – марганец, П – фосфор, Ю – алюминий, Ш – шаровидный графит. Цифры, следующие после букв, обозначают массовое содержание данного компонента в чугуне.

Жаростойкость и окислительная СЧ и ВЧ (до 700... 800°С на воздухе, в среде топочных и генераторных газов) повышают путём легирования кремнием (чугуны марок ЖЧС5, ЖЧС5Ш) и хромом (чугуны марок ЧХ28, ЖЧХ30, ЧХ34). Высокой термостойкостью и сопротивляемостью окислению обладают аустенитные чугуны марок ЧН15Д7 и ЧН15Д3Ш. В качестве жаропрочных чугунов используют аустенитные чугуны с шаровидным графитом марок ЧН19Х3Ш, ЧН11ГХ2Ш, ЧН20Д2Ш. В качестве коррозионностойких применяют чугуны, легированные кремнием (ЧС13, ЧС15, ЧС17) и хромом (ЧХ22, ЧХ28, ЧХ34). Эти чугуны также обладают высокой коррозионной стойкостью и в кислотах. Для повышения коррозионной стойкости кремнистых чугунов их дополнительно легируют молибденом (ЧС15М4, ЧС17М3). Легирование молибденом обеспечивает кремниевым чугунам высокую стойкость в соляной кислоте любой концентрации при всех технологических температурах, в азотной, пикриновой и фосфорной кислотах, а также четырёххлористом углероде, железном купоросе и перекиси водорода. Высокой коррозионной стойко-

стью в шеллох обладают никелевые чугуны, например, аустенитный чугун марки ЧН15Д7. Механические свойства легированных чугунов приведены в табл. 1.31.

Механические свойства легированных чугунов (ГОСТ 7769-82) Таблица 1.31

Вид чугуна	Марка чугуна	Механические свойства				Свойства отливок	
		σв		σт	δ		
		МПа					НВ
хромистый	И	ЧХ1	170	350	207-286	-	Жаростойкие
		ЧХ2	150	310	207-286	-	
		ЧХ3	150	310	228-364	-	Жаростойкие, износостойкие
		ЧХЗТ	200	400	440-590	-	Износостойкие
		ЧХ9Н5	350	700	490-610	-	Износостойкие
		ЧХ16	350	700	400-450	-	Износостойкие, жаростойкие
		ЧХ16М2	170	490	490-610	-	Износостойкие
		ЧХ22	290	540	330-610	-	
		ЧХ22С	290	540	215-340	-	Коррозионностойкие и жаростойкие
		ЧХ28	370	560	215-270	-	
кромистый	И	ЧХ28П	200	400	245-390	-	Стойкие в цинковом расплаве
		ЧХ28Д2	390	690	390-640	-	Износостойкие и коррозионностойкие
		ЧХ32	290	490	245-340	-	Жаростойкие и износостойкие
		ЧС5	150	290	140-300	-	Жаростойкие
		ЧС5Ш	290	-	228-300	-	
		ЧС13	100	210	290-390	-	
		ЧС15	60	170	290-390	-	
		ЧС17	40	140	390-450	-	Коррозионностойкие в жидкой среде
		ЧС15М4	60	140	390-450	-	
		ЧС17М3	60	100	390-450	-	
алюминиевый	И	ЧЮХШ	390	590	187-364	-	Жаростойкие
		ЧЮ6С5	120	240	235-300	-	Жаростойкие и износостойкие
		ЧЮ7Х2	120	170	240-286	-	
		ЧЮ22Ш	290	390	241-364	-	Жаростойкие и износостойкие при высокой температуре
марганцевый	В	ЧЮ30	200	350	364-550	-	
		ЧГ6С3Ш	490	680	219-259	-	Износостойкие
		ЧГ7Х4	150	330	390-450	-	
		ЧГ8Д3	150	330	176-285	-	Маломагнитные, износостойкие
никелевый	И	ЧНХТ	280	430	201-286	-	Коррозионностойкие в газовых средах двигателей внутреннего сгорания
		ЧНХМД	290	690	201-286	-	
		ЧНМШ	490	-	183-286	2	
		ЧНДХМШ	600	-	270-320	-	Коррозионностойкие в газовых средах двигателей внутреннего сгорания, повышенной прочности
		ЧН2Х	290	490	215-280	-	Износостойкие
		ЧН3ХМДШ	550	-	350-550	-	Износостойкие, повышенной прочности
		ЧН4Х2	200	400	400-650	-	Износостойкие
		ЧН11Г7Ш	390	-	120-255	4	Жаропрочные и маломагнитные
		ЧН15Д3Ш	340	-	120-255	4	
		ЧН15Д7	150	350	120-297	-	Износостойкие в двигателях и магнитный
	ЧН19Х3Ш	340	-	120-255	4	Жаропрочные и маломагнитные	
	ЧН20Д2Ш	500	-	120-220	25	Жаропрочные, хладостойкие, маломагнитные	

Примечание. Прочность и твердость высокохромистых, марганцевых и никелевых чугунов указана после их нормализации и низкотемпературного отпуска. И - низколегированный, В - высоколегированный.

Химический состав легированных чугунов приведен в табл. 1.32.

Химический состав легированных чугунов Таблица 1.32

Марка чугуна	Массовая доля элементов, % (остальное - Fe)									
	C	Si	Mn	P		S		Cr	Прочие	
				не более	не более					
ЧХ1	3,0-3,8	1,5-2,0	1,0	0,30	0,12	0,40-1,00	-	-		
ЧХ2	3,0-3,8	2,0-3,0	1,0	0,30	0,12	1,01-2,00	-	-		
ЧХ3	3,0-3,8	2,8-3,8	1,0	0,30	0,12	2,01-3,00	-	-		
ЧХЗТ	2,6-3,6	0,7-1,5	1,0	0,30	0,12	2,01-3,00	-	-		
ЧХ9Н5	2,8-3,6	1,2-2,0	0,5-1,5	0,06	0,10	8,0-9,5	0,5-0,8 Cu; 0,7-1,0 Ti	-		
ЧХ16	1,6-2,4	1,5-2,2	1,0	0,10	0,05	13,0-19,0	4,0-6,0 Ni; 0,0-0,4 Mo	-		
ЧХ16М2	2,4-3,6	0,5-1,5	1,5-2,5	0,10	0,05	13,0-19,0	-	-		
ЧХ22	2,4-3,6	0,2-1,0	1,5-2,5	0,10	0,08	19,0-25,0	1,0-1,5 Cu; 0,5-0,0 Mo*	-		
ЧХ22С	0,6-1,0	3,0-4,0	1,0	0,10	0,08	19,0-25,0	0,15-0,35 V; 0,15-0,35 Ti	-		
ЧХ28	0,5-1,6	0,5-1,5	1,0	0,10	0,08	25,0-30,0	-	-		
ЧХ28П	1,8-3,0	1,5-2,5	1,0	0,8-1,5	0,08	25,0-30,0	-	-		
ЧХ28Д2	2,2-3,0	0,5-1,5	1,5-2,5	0,10	0,08	25,0-30,0	-	-		
ЧХ32	1,6-3,2	1,5-2,5	1,0	≤0,10	0,08	30,0-34,0	0,4-0,8 Ni; 1,5-2,5 Cu	-		
ЧС5	2,5-3,2	4,5-6,0	0,8	0,30	0,12	0,1-0,3 Ti	-	-		
ЧС5Ш	2,7-3,3	4,5-5,5	0,8	0,10	0,07	0,5-1,0	-	-		
ЧС13	0,6-1,4	12,0-14,0	0,8	0,10	0,07	0,0-0,2	0,1-0,3 Al	-		
ЧС15	0,3-0,8	14,1-16,0	0,8	0,10	0,07	-	-	-		
ЧС15М4	0,5-0,9	14,0-16,0	0,8	0,10	0,07	-	-	-		
ЧС17	0,3-0,5	16,1-18,0	0,8	0,10	0,07	-	3,0-4,0 Mo	-		
ЧС17М3	0,3-0,6	16,0-18,0	1,0	0,30	0,10	-	-	-		
ЧЮХШ	3,0-3,8	2,0-3,0	0,5	0,10	0,03	0,4-1,0	2,0-3,0 Mo	-		
ЧЮ6С5	1,8-2,4	4,5-6,0	0,8	0,30	0,12	-	0,6-1,5 Al	-		
ЧЮ7Х2	2,5-3,0	1,5-3,0	1,0	0,30	0,02	1,5-3,0	5,5-7,0 Al	-		
ЧЮ22Ш	1,6-2,5	1,0-2,0	0,8	0,20	0,03	-	5,0-9,0 Al	-		
ЧЮ30	1,0-1,2	0,0-0,5	0,7	0,04	0,08	-	19,0-25,0 Al	-		
ЧГ6С3Ш	2,2-3,0	2,0-3,5	4,0-7,0	0,06	0,03	0,0-0,15	0,05-0,12 Ti; 29,0-31,0 Al	-		
ЧГ7Х4	3,0-3,8	1,4-2,0	6,0-8,0	0,10	0,05	3,0-5,0	0,5-1,0 Mo; 0,5-1,5 Al	-		
ЧГ8Д3	3,0-3,8	2,0-2,5	7,0-9,0	0,30	0,10	-	0,8-1,5 Ni;	-		
ЧНХТ	2,7-3,4	1,4-2,0	0,8-1,6	0,3-0,6	0,15	0,2-0,6	2,5-3,5 Cu; 0,5-1,0 Al	-		
ЧНХМД	2,8-3,2	1,6-2,0	0,8-1,2	0,15	0,12	0,2-0,7	0,3-0,7 Ni; 0,05-0,12 Ti	-		
ЧНХМДШ	3,0-3,6	2,0-2,8	0,6	0,08	0,03	0,2-0,4	0,7-1,6 Ni;	-		
ЧНМШ	2,8-3,8	1,7-3,2	0,8-1,2	0,10	0,03	0,0-0,1	0,2-0,5 Cu; 0,2-0,7 Mo	-		
ЧН2Х	3,0-3,6	1,2-2,0	0,6-1,0	0,25	0,12	0,4-0,6	0,6-1,0 Ni;	-		
ЧН3ХМДШ	3,0-3,6	2,0-2,8	0,8	0,08	0,03	0,2-0,5	1,5-2,0 Ni;	-		
ЧН4Х2	2,8-3,6	0,0-1,0	0,8-1,3	0,30	0,15	0,8-2,5	2,5-4,5 Ni;	-		
ЧН11Г7Ш	2,3-3,0	1,8-2,5	5,0-8,0	0,08	0,03	1,5-2,5	0,6-1,0 Ni;	-		
ЧН15Д7	2,2-3,0	2,0-2,7	0,5-1,6	0,30	0,10	1,5-3,0	10,0-12,0 Ni	-		
ЧН15Д3Ш	2,5-3,0	1,4-3,0	1,3-1,8	0,08	0,03	0,6-1,0	14,0-16,0 Ni; 5,0-8,0 Cu	-		
ЧН19Х3Ш	2,3-3,0	1,8-2,5	1,0-1,6	0,10	0,03	1,5-3,0	14,0-16,0 Ni; 3,0-3,5 Cu	-		
ЧН20Д2Ш	1,8-2,5	3,0-3,5	1,5-2,0	0,03	0,01	0,5-1,0	18,0-20,0 Ni	-		
							19,0-21,0 Ni; 1,5-2,0 Cu;	0,0-0,3 Al		

Примечание. * - при массовой доле Cr 13...16% и 16...19% рекомендуемая массовая доля Mo 2,0...1,5% и 1,5...0,5% соответственно.

Никозелегированные чугуны всех видов, а также высоколегированные марганцевые и никелевые, за исключением марок ЧН2Х, ЧНЗТ, ЧГ7Х4, ЧН4Х2, модифицирующего 75%-ным ферросилицием или другими графитизирующими присадками.

В хромистых чугунах и чугунах с шаровидным графитом допускается массовая доля никеля до 1,0% или меди до 1,5%, вводимых природно-легированным чугуном, легированным стальным ломом или магниисодержащей лигатурой.

В чугуне с шаровидным графитом должно быть не менее 80% графитовых включений шаровидной формы.

Рекомендуемые виды термической обработки отливок из легированных чугунов приведены в табл. 1.33.

Рекомендуемые виды термической обработки отливок из легированных чугунов

Таблица 1.33

Термообработка и её назначение	Виды чугунов	Режим термообработки		
		Температура нагрева и длительность изотермической выдержки		охлаждение
		t, °C	τ, ч	
Высокотемпературный графитизирующий отжиг для уменьшения твердости и содержания структурно-свободного цемента	Низколегированные всех видов за исключением износостойких	900–1000	6–12	С печью
	Высоколегированные кремнистые	860–880	1–2	С печью
Гомогенизирующая выдержка с нормализацией для снижения магнитной проницаемости, твердости, повышения пластичности и твердости	Высоколегированные марганцевые и никелевые, исключая марки ЧН4Х2 и ЧГ7Х4	980–1040	4–6	На воздухе (в масле или жидком стекле)
	Высокохромистые износостойкие	1050–1100	1–2	На воздухе
Нормализация для повышения твердости отливок	Низколегированные хромистые, алюминиевые и никелевые, а также износостойкие чугуны ЧН4Х2 и ЧГ7Х4	860–880	1–2	На воздухе
	Для всех видов, кроме высокохромистых и высокоалюминиевых	200–250	2–3	С печью
Отпуск или нормализация для снятия внутренних напряжений	Для высоколегированных хромистых и алюминиевых чугунов	520–560	3–4	С печью
	Высоколегированные	690–750	6–12	С печью
Отжиг и высокий отпуск для снижения твердости и улучшения обрабатываемости	Низколегированные	660–690	6–12	С печью
	Высоколегированные с шаровидным графитом	450–650 (на 30–50 °C выше температуры эксплуатации)	4–6	С печью

Примечание. Время нагрева выбирают в зависимости от размеров и массы отливок.

Эксплуатационные свойства наиболее широко используемых легированных чугунов приведены в табл. 1.34.

Таблица 1.34

Марка чугуна	Эксплуатационные свойства чугуна
1	2
ЧХ1	Повышенная коррозионная стойкость в газовой, воздушной, щелочной средах в условиях трения и износа. Жаростойкий в воздушной среде до 500°C.
ЧХ2	Повышенная коррозионная стойкость в газовой, воздушной, щелочной средах в условиях трения и износа. Жаростойкий в воздушной среде до 600°C.
ЧХ3	Повышенная коррозионная стойкость в газовой, воздушной, щелочной средах в условиях трения и износа. Жаростойкий в воздушной среде до 700°C.
ЧХ3Т	Повышенная стойкость против абразивного износа и истирания в пульпо- и пылепроводах, насосах.
ЧХ9Н5	Высокая стойкость против абразивного износа и истирания в мельницах, пескомётах, дробетётных и дробеструйных камерах.
ЧХ16	Жаростойкий в воздушной среде до 900°C, износостойкий при нормальной и повышенной температурах, устойчив против воздействия неорганических кислот большой концентрации.
ЧХ16М2	Наибольшая устойчивость против ударно-абразивного износа и истирания в мельницах, дробетётных и дробеструйных камерах.
ЧХ22, ЧХ28Д2	Высокоустойчивый против абразивного износа и истирания в условиях размольного оборудования, грохотов, склизов, агломашии, песко- и дробеструйных камер при повышенной температуре.
ЧХ22С	Повышенная коррозионная стойкость в запылённых газовых средах при температуре до 1000°C, высокая кислотостойкость и сопротивление межкристаллитной коррозии.
ЧХ28, ЧХ32	Высокая коррозионная стойкость в растворах кислот (азотной, серной, фосфорной, соляной, уксусной, молочной и т.д.), щелочей и солей (азотнокислом аммония, сульфате аммония, хлорной извести, хлорном железе, селитре), в газах, содержащих серу или SO ₂ , H ₂ O. Жаростойкость до температур 1100 - 1200°C. Высокое сопротивление абразивному износу.
ЧХ28П	Высокая стойкость после окислительного отжига в цинковых расплавах при температуре до 550°C.
ЧС5	Жаростойкие в топочных газах и воздушной среде до 700°C.
ЧС5Ш	Жаростойкие в топочных газах и воздушной среде до 800°C.
ЧС13, ЧС15, ЧС17	Высокая коррозионная стойкость при температуре до 200°C к воздействию концентрированных и разбавленных кислот, растворов щелочей, солей, кроме фтористоводородных и фтористых соединений. Не допускают резкопеременных, а также ударных нагрузок и перепада температур.
ЧС15М4, ЧС17М3	Особо высокая коррозионная стойкость в серной, азотной, соляной кислотах разной концентрации и температуры, водных растворах щелочей и солей при местном перепада температур до 30°C в теле детали при отсутствии динамических, а также переменных и пульсирующих нагрузок.
ЧЮХШ	Жаростойкий в воздушной среде до 650°C, стойкий против истирания.
ЧЮ7Х2	Жаростойкий в воздушной среде до 750°C, стойкий против истирания.
ЧЮ6С5	Жаростойкий в воздушной среде до 800°C, коррозионностойкий в среде, содержащей соединения серы, стойкий к режим сменам температуры.
ЧЮ22Ш	Жаростойкий в среде, содержащей серу, сернистый газ, окислы ванадия и окислы воды. В воздушной среде жаростойкий до 1100°C. Высокая прочность при нормальной и повышенной температуре.
ЧЮ30	Жаростойкий в воздушной среде до 1100°C, стойкий против износа.
ЧГ6СЗШ, ЧГ7Х4	Износостойкий в абразивной среде и против истирания в пыле- и пульпопроводах, мельницах и т.д.
ЧГ8Д3	Немагнитный, износостойкий чугун для эксплуатации в условиях повышенных температур.
ЧНХТ	Высокие механические свойства, сопротивление износу и коррозии в слабощелочных и газовых средах (продукты сгорания топлива, технический кислород), водных растворах.
ЧНХМД	Высокие механические свойства, сопротивление износу и коррозии в слабощелочных и газовых средах (продукты сгорания топлива, технический кислород), водных растворах.
ЧНМШ	Повышенные механические свойства и термостойкость при температуре до 500°C.
ЧН2Х	Высокие механические свойства, сопротивление износу и коррозии в слабощелочных и газовых средах (продукты сгорания топлива, технический кислород), водных растворах и расплавах каустика.
ЧН4Х2	Высокая стойкость против абразивного износа и истирания.

1	
ЧН15Д7, ЧН15Д3Ш	Высокая коррозионная и эрозийная стойкость в щелочах, слабых растворах кислот, серной кислоте любой концентрации при температуре более 50°С, в морской воде, в среде перегретого водяного пара. Чугун имеет высокий коэффициент термического линейного расширения.
ЧН11Г7Ш, ЧН19Х3Ш	Жаропрочность при температуре до 600°С, высокая коррозионная и эрозийная стойкость в щелочах, слабых растворах кислот, серной кислоте любой концентрации при температуре более 50°С, в морской воде, в среде перегретого водяного пара. Чугун имеет высокий коэффициент термического линейного расширения, парамагнитен при низком содержании хрома.
ЧН20Д2Ш	Высокие механические свойства при температуре до минус 100°С. Высокая ударная вязкость. Может быть пластически деформирован в холодном состоянии.
ЧНХМДШ	Высокие механические свойства, сопротивление износу и коррозии в слабощелочных и газовых средах (продукты сгорания топлива, технический кислород), водных растворах.
ЧНЗХМДШ	Высокие механические свойства, сопротивление износу и коррозии в слабощелочных и газовых средах (продукты сгорания топлива, технический кислород), водных растворах и расплавах каустика.

Медь и медные сплавы. Методом литья по выплавляемым моделям изготавливают отливки как из чистой (красной) меди, так и из сплавов на её основе. Отливки из чистой меди применяют в электротехнических машинах, химических аппаратах и т.п. Основными требованиями к отливкам из чистой меди являются требования по электро- и теплопроводности, в связи с чем медь (по примесям) в отливках должна быть очень чистой. Кроме того, при литье фасонных отливок от меди требуются достаточно высокие механические свойства.

Наибольшее понижение тепло- и электропроводности меди вызывают химические элементы, обладающие ограниченной растворимостью или совсем не растворяющиеся в меди. Поэтому для получения отливки с требуемым уровнем показателей электро- и теплопроводности, при подборе шихтовых материалов и выплавке меди наибольшее внимание уделяют именно примесям данного типа. Для получения медным отливкам большей прочности, в медь, например, вводят 0,9% кадмия, который при снижении электропроводности меди на 10...11% повышает предел её прочности в 2,7...3,1 раза.

При получении отливок из чистой меди основное внимание следует обращать на полноту раскисления меди и тщательность прокаливания КО, максимально понижая их газотворность. Как литейный материал чистая медь имеет плохие литейные свойства: низкую жидкотекучесть, большую склонность к образованию трещин и поглощению газов во время плавки и заливки, высокую линейную и объёмную усадку.

В отличие от меди, медные сплавы характеризуются более низкой электро- и теплопроводностью, но обладают более высокой прочностью и антифрикционными свойствами, коррозионной стойкостью в пресной и морской воде, паровоздушной среде. Медные сплавы не магнитны, легко полируются и обрабатываются резанием, сохраняют пластичность при низкой температуре.

Маркировка медных сплавов. На основе меди изготавливают две основные группы сплавов – бронзы и латуни. В маркировке бронзы первыми буквами являются буквы – Бр, при маркировке латуни – Л. Следующие за буквами Бр или Л буквы и цифры означают, соответственно, основные химические элементы и их содержание (по массе) в составе сплава. В марке медных сплавов буквы химических элементов обозначают: А – алюминий, Мц – марганец, С – свинец, Б – бериллий, Мг – магний, Ср – серебро, Ж – железо, Мш – мышьяк, Су – сурьма, К – кремний, Н – никель, Т – титан, Кд – кадмий, О – олово, Ф – фосфор, Х – хром, Ц – цинк.

Химический состав, а также основные механические свойства бронз и латуни приведены в табл. 1.35...1.38.

Таблица 1.35

Химический состав оловянных бронз (ГОСТ 613-79)

Марка бронзы	Массовая доля элементов, % (остальное – Sn)				
	Sn	Zn	Pb	Прочие	Примеси (не более)
БрО3Ц12С5	2,0–3,5	8,0–15,0	3,0–6,0	–	1,3
БрО3Ц7С5Н1	2,5–4,0	6,0–9,5	3,0–6,0	0,5–2,0 Ni	1,3
БрО4Ц7С5	3,0–5,0	6,0–9,0	4,0–7,0	–	1,3
БрО4Ц4С17	3,5–5,5	2,0–6,0	14,0–20,0	–	1,3
БрО5Ц5С5	4,0–6,0	4,0–6,0	4,0–6,0	–	1,3
БрО5С25	4,0–6,0	–	23,0–26,0	0,5 Zn	1,2
БрО6Ц6С3	5,0–7,0	5,0–7,0	2,0–4,0	–	1,3
БрО8Ц4	7,0–9,0	4,0–6,0	–	0,5 Pb	1,0
БрО10Ф1	9,0–11,0	–	–	0,4–1,1 P, 0,3 Zn, 0,3 Pb	1,0
БрО10Л2	9,0–11,0	1,0–3,0	–	0,5 Pb	1,0
БрО10Ц10	9,0–11,0	–	8,0–11,0	0,5 Zn	0,9

Таблица 1.36

Химический состав безоловянных бронз (ГОСТ 493-79)

Марка бронзы	Массовая доля элементов, % (остальное – Cu)					
	Al	Fe	Mn	Ni	Pb	Прочие
БрА9Мц2Л	8,0–9,5	–	1,5–2,5	–	–	–
БрА10Мц2Л	9,6–11,0	–	1,5–2,5	–	–	2,8
БрА9Ж3Л	8,0–10,5	2–4	–	–	–	2,7
БрА10Ж3Мц2	9–11	2–4	1–3	–	–	2,0
БрА10Ж4Н4Л	9,5–11,0	3,5–5,5	–	3,5–5,5	–	1,0
БрА11Ж6Н6	10,5–11,5	5,0–6,5	–	5,0–6,5	–	1,5
БрА9Ж4Н4Мц1	8,8–10,0	4,0–5,0	0,5–1,2	4–5	–	1,5
БрС30	–	–	–	–	27–31	–
БрА7Мц15Ж3Н2Ц2	6,6–7,5	2,5–3,5	14–15	1,5–2,5	–	1,5–2,5 Zn
БрСуЗНЗЦ3С20Ф	–	–	–	3–4	18–22	0,15–0,30 P, 3–4 Zn, 3–4 Sb

Примечание. По требованию потребителя, в бронзе БрСуЗНЗЦ3С20Ф допускается массовая доля сурьмы – 3,4...4,5%, никеля – 4,5...6,0%, фосфора – 0,25...0,4%.

Таблица 1.37

Химический состав латуней (ГОСТ 17711-93)

Марка латуни	Массовая доля элементов, % (остальное – Zn)					
	Cu	Al	Fe	Mn	Pb	Примеси (не более)
ЛЦ40С	57–61	–	–	–	–	0,8–2
ЛЦ40Сд	58–61	–	–	–	–	0,8–2
ЛЦ40Мц1,5	57–60	–	–	1,0–2,0	–	2,0
ЛЦ40Мц3Ж	53–58	–	0,5–1,5	3,0–4,0	–	1,7
ЛЦ40Мц3А	55–58,5	0,5–1,5	–	2,5–3,5	–	1,5
ЛЦ38Мц2С2	57–60	–	–	1,5–2,5	–	1,5–2,5
ЛЦ37Мц2С2К	57–60	–	–	1,5–2,5	0,5–1,3	1,5–2,5
ЛЦ30А3	66–68	2,0–3,0	–	–	–	2,6
ЛЦ25С2	70–75	–	–	–	0,5–1,5	1,0–3,0
ЛЦ23А6Ж3Мц2	64–68	4,0–7,0	2,0–4,0	1,5–3,0	–	1,8
ЛЦ16К4	78–81	–	–	–	3,0–4,5	2,5
ЛЦ14К3С3	77–81	–	–	–	2,5–4,5	2,0–4,0

Примечание. Массовая доля Ni допускается за счёт Cu и в сумму примесей не входит. В латуни ЛЦ40Мц3Ж (для гребных винтов) массовая доля Cu = 55...58%, Al ≤ 0,8%, Pb ≤ 0,3%. По требованию потребителя, в латуни ЛЦ40Сд допускается доля Pb = 1,2...2,0%. В латуни ЛЦ16К4, по согласованию с потребителем, допускается доля Al ≤ 0,1% (при изготовлении деталей, не требующих гидравлической плотности), а в латуни ЛЦ38Мц2С2 допускается доля Pb = 1,2...2,0%.

Механические и технологические свойства
бронз и латуней (для песчаной формы)

Таблица 1.38

Марка сплава	Механические свойства			Усадка, %		Относительная жидкотекучесть ¹
	σ_B , МПа не менее	δ , %	НВ	линейная	объемная	
Оловянные бронзы						
БрО3Ц12С5	176,2	8	60	—	—	—
БрО3Ц7С5Н1	176,2	8	60	1,6	4,8	1
БрО4Ц7С5	147,0	6	60	—	—	—
БрО4Ц4С17	147,0	5	60	1,6	4,8	1,125
БрО5Ц5С5	147,0	6	60	1,6	4,8	1
БрО5С25	147,0	5	45	—	—	—
БрО5С25	147,0	6	60	—	—	—
БрО6Ц6С3	196,0	10	75	—	—	—
БрО8Ц4	215,5	3	80	1,5	4,5	1,125
БрО10Ф1	215,5	10	65	1,5	4,5	1
БрО10Ц2	176,2	7	65	—	—	—
БрО10Ц10	176,2	7	65	—	—	—
Безоловянные бронзы						
БрА9Мц2Л	392,0	20	80	—	—	—
БрА10Мц2Л	490,0	12	110	2,0	6,0	1,25
БрА9Ж3Л	392,0	10	100	2,5	7,5	2
БрА10Ж3Мц2	392,0	10	100	—	—	—
БрА10Ж4Н4Л	587,0	5	160	2,4	7,2	1,875
БрА11Ж6Н6	587,0	2	250	—	—	—
БрА9Ж4Н4Мц1	587,0	12	160	—	—	—
БрС30	—	—	—	1,6	4,8	1,25
БрА7Мц15Ж3Н2Ц2	607,0	18	—	—	—	—
БрСу3Н3Ц3С20Ф	—	—	—	—	—	—
Латуни						
ЛЦ40С	215,0	12	70	2,2	6,6	2,2
ЛЦ40Сд	—	—	—	—	—	—
ЛЦ40Мц1,5	272,0	20	100	1,6-1,8	5,8	1,5
ЛЦ40Мц3Ж	441,0	18	90	—	—	—
ЛЦ40Мц3А	—	—	—	—	—	—
ЛЦ38Мц2С2	245,0	15	80	1,6-1,8	5,9	—
ЛЦ37Мц2С2К	—	—	—	—	—	—
ЛЦ30А3	294,0	12	80	2,1	6,2	—
ЛЦ25С2	—	—	—	—	—	—
ЛЦ23А6Ж3Мц2	—	—	—	—	—	—
ЛЦ16К4	—	—	—	1,7	5,1	1,5
ЛЦ14К3С3	—	—	—	—	—	—

Примечание. ¹ — относительно жидкотекучести бронзы БрО5Ц5С5. Обработка данных [170].

Бронза. Сплавы меди с различными химическими элементами (оловом, кремнием, никелем, алюминием и др., кроме цинка) — называют бронзами. При 20 °С, плотность бронз, в зависимости от их химического состава, находится в пределах от 7500 до 9400 кг/м³.

В зависимости от наличия в сплаве олова, бронзы делят на оловянные и безоловянные.

Оловянные бронзы. Оловянные бронзы широко применяют для производства деталей с антифрикционными свойствами, арматуры, работающей в условиях повышенного давления воды и водяного пара. Оловянные бронзы являются одними из лучших антифрикционных материалов, хорошо работающих в условиях ударных нагрузок, обладают высокой коррозионной стойкостью.

Помимо всего прочего двухкомпонентная бронза, содержащая 22...24% олова, используется для литья колоколов, а бронзы БрО5Ц5С5 и БрО10Ф1 широко используют в художественном литье.

Бронзы имеют хорошую жидкотекучесть, что в сочетании с возможностью метода литья по выплавляемым моделям изменять начальную температуру КО в значительных пределах, а также низкая усадка бронз, делает их хорошим литейным материалом.

Данная группа сплавов обладает высокой склонностью к образованию рассеянной усадочной пористости, что является следствием их широкого интервала кристаллизации (150...200°С) и причиной относительно низкой герметичности тонкостенных литых деталей. Оловянные бронзы с высоким содержанием олова склонны к образованию горячих трещин в отливках.

К числу вредных элементов в оловянных бронзах относятся алюминий и кремний, резко снижающие механические свойства бронз уже при содержании в сотых долях процента и резко повышающие склонность бронз к образованию горячих трещин в отливках. В связи с высокой стоимостью и дефицитностью олова высокооловянные бронзы используют только для получения отливок ответственного назначения. Во всех остальных случаях применяют малооловянные бронзы, дополнительно легированные цинком и свинцом.

Использование цинка позволяет не только снизить стоимость бронзы, но и улучшить литейные свойства малооловянных бронз, повысить их коррозионную стойкость в морской воде и понизить пористость металла отливок. Свинец, кроме повышения литейных свойств, способствует улучшению антифрикционных свойств, повышает обрабатываемость бронзы и повышает герметичность отливок. Использование фосфора в составе бронзы повышает её жидкотекучесть и износостойкость. Кроме того, фосфор является хорошим раскислителем и упрочнителем. Никель в малооловянистых бронзах измельчает зерно, повышает прочность и пластичность металла. С целью повышения герметичности отливок в оловянную бронзу вводят комплексную добавку (0,02...0,04%) Be + (0,05...0,10%) Ti [288].

Безоловянные бронзы. Методом литья по выплавляемым моделям также изготавливают фасонные отливки из алюминиевой, кремнистой, свинцовой бронзы и бронз специального назначения. Безоловянные бронзы, по сравнению с оловянными бронзами, имеют более высокие механические, коррозионные и антифрикционные свойства, однако, в отличие от оловянных бронз, обладают значительно худшими показателями литейных свойств.

Алюминиевые бронзы (основа Cu-Al) из числа известных марок бронз получили наибольшее распространение для получения отливок методом литья по выплавляемым моделям. Бронзы с содержанием алюминия до 9,4% имеют однофазную структуру α — твердого раствора. Двухфазную структуру (α -фаза + γ -фаза) сплавы меди с алюминием приобретают при содержании алюминия 9,4...15,6%. Оптимальным сочетанием значений механических свойств обладают алюминиевые бронзы, содержащие 5...8% алюминия. Увеличение содержания алюминия до 10...11%, вследствие появления λ -фазы в структуре сплава, ведет к резкому повышению его прочности и значительноному снижению пластичности. Дополнительного повышения прочности сплавов, содержащих 8...9,5% алюминия, достигают закалкой отливок.

Нередко алюминиевыми бронзами заменяют более дорогостоящие оловянные бронзы. По сравнению с оловянными, алюминиевые бронзы обладают следующими преимуществами: более высокой прочностью и жаропрочностью, меньшей склонностью к хладноломкости, меньшей склонностью к внутрикристаллической ликвации, меньшей пористостью в отливках.

Основными недостатками алюминиевых бронз являются: значительная усадка при затвердевании и охлаждении отливок, склонность к образованию транскристаллитной структуры в отливках и росту зерна при нагреве, что способствует резкому понижению пластичности сплава, склонность к значительному газопоглощению и окислению в жидком состоянии, самоотпуск сплава при медленном охлаждении, невысокая коррозионная стойкость в перегретом паре.

Для устранения этих недостатков сплавы дополнительно легируют марганцем, железом, никелем, свинцом. Дополнительно легированные алюминиевые бронзы называют специальными алюминиевыми бронзами.

Все алюминиевые бронзы характеризуются высокой жидкотекучестью и склонны к образованию столбчатой (транскристаллитной) структуры в отливках. Для измельчения структуры и повышения прочности в алюминиевые бронзы дополнительно вводят железо или марганец, а также $0,2\%$ В, Nb или V. Для повышения коррозионной стойкости, прочности и пластичности в алюминиевую бронзу вводят марганец, а для повышения герметичности отливок — $0,02\%$... $0,06\%$ Be [288].

Алюминиевая бронза склонна к вспениванию при заливке и, как было отмечено выше, интенсивному образованию окисных плёнок и поглощению газов. В связи с этим заливку форм проводят с умеренной удельной скоростью, спокойно, с сифонным или боковым целевым подводом расплава в отливку. При затвердевании алюминиевая бронза в термических узлах отливок образует концентрированные усадочные раковины, что вызывает необходимость установки на них массивных прирублей или использования холодильников.

Алюминиево-никелевые бронзы (основа Cu-Al-Ni) обладают высокими механическими свойствами, износостойкостью и жаропрочностью. Использование никеля обеспечивает дисперсионное твердение алюминиевой бронзы в результате образования в её структуре интерметаллидных фаз (Ni_3Al и $NiAl$). Образование интерметаллидных фаз повышает твёрдость и прочность бронзы, а также увеличивает температурный порог её использования до 500°C .

Свинцовые бронзы (основа Cu-Pb) при высоких удельных нагрузках и высоких скоростях скольжения обладают хорошими антифрикционными свойствами и используются взамен оловянных бронз. Для получения однородной структуры в различных по толщине стенках отливки из свинцовой бронзы требуется интенсивный тепловод от поверхности отливки в процессе кристаллизации металла. Для улучшения бронзу дополнительно легируют Mn, Ni, P, Sn и т.п.

Марганцевая бронза (основа Cu-Mn) характеризуется высокой коррозионной стойкостью и жаропрочностью.

Кремнистая бронза (основа Cu-Si) характеризуется высокой жидкотекучестью и наибольшим температурным интервалом кристаллизации. По своим механическим свойствам кремнистая бронза превосходит оловянную бронзу. Для повышения литейных и эксплуатационных свойств в кремнистую бронзу вводят цинк или свинец. Отличительной чертой кремнистой бронзы является её относительно низкая температура плавления и заливки.

Свойства кремнистой бронзы весьма чувствительны к наличию в ней примесей. В связи с этим содержание вредных примесей в бронзе ограничено следующими пределами (не более): $0,002\%Bi$, $0,05\%Sb$, $0,5\%Sn$, $2\%Fe$.

Кремнистые бронзы (BrK3Mц1, BrK4) применяют как заменители оловянных бронз. Эти бронзы немагнитны и морозостойки, превосходят оловянные бронзы по коррозионной стойкости, хорошо свариваются и подвергаются пайке.

Латунь. Латунь (основа Cu-Zn), в зависимости от степени легирования различными компонентами, имеют плотность от 8300 до 8420 кг/м^3 (при 20°C).

Латуни классифицируют на простые и специальные. Простые латуни являются сплавами меди и цинка. Сложные латуни, помимо меди и цинка, содержат свинец, алюминий, марганец, железо, никель, кремний, олово и другие химические элементы. Дополнительное легирование простых латуней повышает их прочность, твёрдость, коррозионную стойкость, улучшает литейные свойства.

Вследствие относительно небольшого интервала кристаллизации латуни обладают высокими литейными свойствами, склонны к образованию транскристаллитной структуры, что позволяет получать отливки с низкой величиной усадочной пористости. Латуни обладают высокими механическими свойствами, коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах (морской и пресной воде, серной кислоте и т.п.).

Главной особенностью латуни, как литейного материала, является её "самораскисление" в процессе плавки, за счёт присутствующего в её составе цинка. В процессе плавки латуни происходит непрерывное испарение цинка с зеркала расплава в тигле плавильной печи, что сопровождается рафинированием расплава и его защитой от насыщения атмосферными и печными газами.

Алюминий в латунах повышает жидкотекучесть, прочность и коррозионную стойкость. Марганец, при некотором снижении жидкотекучести, также способствует повышению прочности и коррозионной стойкости. Железо измельчает зерно и повышает механические свойства латуни при некотором снижении жидкотекучести. Кремний повышает прочность при сохранении пластических свойств латуни, однако при этом повышает и склонность латуни к образованию горячих трещин и газовой пористости в отливках. Свинец улучшает антифрикционные свойства латуней и обрабатываемость резанием. Олово практически не влияет на литейные свойства латуни, улучшая её механические свойства.

Кремнистая латунь имеет высокую жидкотекучесть, хорошую обрабатываемость и свариваемость, склонна к поглощению газов во время плавки и образованию газовой раковины в отливках. Кремнистая латунь имеет значительную объёмную усадку при кристаллизации, склонна к образованию усадочных раковин и рыхлот в тепловых узлах отливок.

При высоких температурах, кремнистая латунь недостаточно пластична, что может явиться причиной образования горячих трещин в отливках. В связи с этим заливку форм кремнистой латуни следует проводить при низкой температуре расплава, а ЛПС следует проектировать так, чтобы она обеспечивала спокойное заполнение формы расплавом и улавливала окисные плёны.

Кремнистая латунь обладает высокой коррозионной стойкостью в морской и пресной воде, водяном паре (при температуре до 300°C), нефти, бензине спиртах и т.п. Кремнистую латунь используют для изготовления арматуры, работающей под воздушным и гидравлическим давлением. Дополнительное легирование кремнистой латуни свинцом повышает её антифрикционные свойства и делает её более химически стойкой в серной кислоте, чем оловянная бронза. С целью повышения герметичности отливок в кремнистую латунь вводят $0,01\%$... $0,04\%$ В (например, в виде ферробора) [288].

Свинцовая латунь имеет более низкие механические свойства по сравнению с другими марками латуни. Свинцовая латунь характеризуется хорошей обрабатываемостью режущим инструментом, обладает хорошими антифрикционными свойствами.

Алюминиевая латунь обладает высокой коррозионной стойкостью в морской воде, в связи с чем она находит применение в судостроении и, ограниченно, в машиностроении.

Марганцевая латунь обладает высокими механическими свойствами, коррозионной стойкостью и жаропрочностью. Дополнительное легирование латуни железом, никелем и свинцом повышает механические и литейные свойства марганцевой латуни.

Оловянная латунь (содержание олова в латуни составляет 1,0...1,5%, по массе) обладает хорошей коррозионной стойкостью в морской воде и влажном морском воздухе, вследствие чего она получила название морской латуни.

Благодаря особенностям своих эксплуатационных свойств, а также надёжности и долговечности литье детали из бронз и латуней нашли широкое распространение в самых различных областях техники. Области применения отливок из бронз и латуней приведены в табл. 1.39.

Области применения отливок из бронз и латуней Таблица 1.39

Марка сплава	Свойства сплава	Область применения отливок
1	2	3
BrO3Ц7C5H1	Высокая жидкотекучесть. Хорошие технологические свойства. Высокие антифрикционные свойства.	Детали для работы в условиях морской и пресной воды, под давлением водяного пара до 25 атм, детали нефтяной и воздушной арматуры.
BrO5Ц5C5	То же	Арматура для работы под давлением воды при давлении до 25 атм.
BrO4Ц4C17	Хорошие технологические и высокие антифрикционные свойства.	Закоперженные, ударные нагрузки, детали арматуры.
BrO10Ц2	Склонна к образованию горячих трещин в отливках. Высокие антифрикционные свойства.	Детали для работы в пресной и морской воде, паровоздушной атмосфере и маслах в условиях повышенного давления
BrO10Ф1	Склонна к образованию горячих трещин в отливках. Высокая жидкотекучесть. Высокие антифрикционные свойства.	Детали с антифрикционными свойствами (вкладыши подшипников, червячные колёса, кольца и т.п.).
BrO10C10	Склонна к образованию горячих трещин в отливках. Высокие антифрикционные свойства.	Работа в условиях трения (вкладыши подшипников, червячные колёса и т.п.).
BrA10Mц2Л	Удовлетворительные литейные и технологические свойства.	Работа в условиях трения. Арматура, работающая в пресной воде, жидком топливе и водном паре до 250°С.
BrA9Ж3Л	То же	Различная арматура, детали с антифрикционными свойствами.
BrA9Ж4H4Mц1	То же	Арматура, работающая в условиях морской воды.
BrA10Ж4H4Л	Удовлетворительные литейные и технологические свойства.	Ответственные, тяжело-нагруженные детали с повышенными антифрикционными свойствами, детали химической и пищевой промышленности, судостроения.

Окончание табл. 1.39		
1	2	3
BrC30	Высокие антифрикционные свойства. Ликвация свинца в отливках.	Заменитель оловянной бронзы при работе деталей в условиях больших удельных нагрузок и при высоких скоростях скольжения. Детали с антифрикционными свойствами.
ЛЦ40С	Высокие антифрикционные свойства.	Детали с высокими антифрикционными свойствами, арматура, сепараторы.
ЛЦ40Mц1,5	Высокие антифрикционные свойства. Дополнительное легирование оловом повышает коррозионную стойкость в морской воде.	Изготовление жаростойких и коррозионностойких деталей, детали, работающие в условиях ударных нагрузок, а также детали узлов трения, работающих в условиях спокойной нагрузки при температуре не выше 60°С.
ЛЦ38Mц2C2	Высокая коррозионная стойкость в морской воде и хорошие антифрикционные свойства	Конструкционные детали и аппаратура для судов, антифрикционные детали.
ЛЦ30A3	Высокая коррозионная стойкость в морской воде	Детали для машиностроения и судостроения, работающие в условиях морской воды.
ЛЦ16K4	Высокая жидкотекучесть, склонна к образованию трещин в отливках. Хорошо обрабатывается резанием. Низкая пластичность при высокой температуре. Примеси Al и Pb снижают жидкотекучесть, способствуют образованию газовой пористости в отливках.	Арматура, работающая при повышенном воздушном и гидравлическом давлении, работающая в агрессивных средах (морской воде, серной кислоте и др.), детали, работающие при температуре до 250°С.

Влияние химических элементов на свойства сплавов, изготовленных на основе меди, приведено в табл. 1.40.

Влияние химических элементов на свойства медных сплавов Таблица 1.40

Элемент	Оловянные бронзы			Безоловянные бронзы			Латуни		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Al		Понижает жидкотекучесть, коррозионную стойкость и прочность сплава. Резко повышает склонность к пленообразованию.	Понижает жидкотекучесть и механические свойства. В алюминиевых бронзах резко снижает пластические свойства при содержании более 8%.						
Sn		Понижает плотность и пластические свойства металла. Повышает коррозионную стойкость и антифрикционные свойства.	В марганцевистых бронзах понижает коррозионную стойкость. В свинцовистых бронзах повышает прочность и твердость. В алюминиевых бронзах ухудшает механические свойства, повышает пористость отливок.						В меньшей степени, чем алюминий, повышает жидкотекучесть, механические свойства. Значительно повышает коррозионную стойкость в морской и пресной воде. В хромистых латунях снижает пластические свойства и понижает герметичность отливок.

1	2	3	4
Zn	Понижает усадку и, при содержании до 4%, повышает жидкотекучесть. При содержании до 5% повышает прочность. При содержании более 5% понижает коррозионную стойкость и антифрикционные свойства, увеличивает чистоту сплава по Н.В. и герметичность отливок.	Повышает жидкотекучесть и антифрикционные свойства. В алюминиевых бронзах понижает технологические и антифрикционные свойства. В кремнистых бронзах повышает механические свойства, улучшает герметичность отливок.	Повышает механические свойства.
Pb	Повышает антифрикционные свойства и обрабатываемость резанием. Заметно снижает механические свойства. Повышает герметичность отливок.	Повышает антифрикционные свойства, но снижает механические свойства. В алюминиевых бронзах до 1,5% на механические свойства не влияет, но улучшает жидкотекучесть, антифрикционные свойства и обрабатываемость резанием.	У алюминиевых и марганцовых латуней повышает жидкотекучесть, но снижает механические свойства. Повышает антифрикционные свойства и обрабатываемость резанием. В кремнистых латунях, при содержании более 3-4%, резко понижает механические свойства, заметно понижает жидкотекучесть и герметичность отливок, увеличивает склонность сплава к горячим трещинам.
Ni	Повышает механические и антифрикционные свойства, плотность и коррозионную стойкость. Способствует выравниванию механических свойств в стенках отливок с различной толщиной, измельчает зерно.	Понижает жидкотекучесть и механические свойства кремнистых бронз. В свинцовых и сурьмяно-никелевых бронзах повышает жидкотекучесть, механические свойства и коррозионную стойкость. В свинцовых бронзах уменьшает ликвацию свинца.	Повышает механические свойства, коррозионную стойкость. Повышает стойкость к обесцинковыванию и межкристаллитной коррозии. В кремнистой латуни понижает пластические свойства и повышает твердость.
Fe	Понижает жидкотекучесть, пластичность и плотность. Резко понижает коррозионную стойкость. До 0,03% повышает прочность, измельчает структуру, прелюстывает рекристаллизацию сплава. При больших количествах понижает герметичность отливок.	В свинцовых бронзах понижает механические свойства. В кремнистых бронзах повышает жаропрочность, понижает коррозионную стойкость, измельчает структуру сплава, повышает хрупкость сплава, понижает герметичность отливок.	Понижает жидкотекучесть, пластичность и коррозионную стойкость. Повышает механические свойства, измельчает структуру. При содержании более 0,03% придает магнитные свойства. В кремнистых латунях понижает жидкотекучесть и герметичность. При содержании более 1,0-1,3% заметно понижает механические свойства.
Si	См. влияние Fe.	В кремнистых бронзах повышает жидкотекучесть, коррозионную стойкость, твердость, прочность и, при содержании до 3%, относительное удлинение. В алюминиевых бронзах повышает жидкотекучесть и пористость отливок.	Повышает жидкотекучесть, прочность, коррозионную стойкость, антифрикционные свойства.

В некоторых случаях, литые детали из сплавов на основе меди используют в декоративных целях. В этих случаях от отливки требуется только безукоризненный внешний вид и определенный цвет. Для изготовления таких литых деталей могут быть использованы сплавы меди с оловом или цинком. В этом случае основной ха-

рактеристикой сплава является блеск и цвет поверхности литой детали, который может изменяться от серого до красного, включая имитацию золота и его сплавов (цыганское золото, хризокальк, симилор, мангеймское золото). Цвета и оттенки медных сплавов с оловом и цинком указаны в табл. 1.41.

Таблица 1.41 Цвета и оттенки двойных медных сплавов [168]

Массовая доля меди в сплаве, % (остальное - Sn или Zn)	Цвет сплава	
	с оловом	с цинком
	99	Бледно-красный
96	Бледно-розовый	Красный с желтизной
92	Красновато-желтый	Коричнево-красный
90	Оранжево-желтый	Красно-желтый
85	Желтый	Желто-красный
80	Желтый с золотистым отливом	Красновато-желтый
75	Голубовато-красный	Светло-желтый
73	Темно-серый	Желтый
70	Белый	Желтый
65	Голубовато-белый	Ярко-желтый
50	Светло-серый	Золотисто-желтый

Медно-никелевые сплавы (мельхиор, нейзильбер), состав которых приведен в табл. 1.42, применяют в тех случаях, когда отливкам необходимо придать вид серебряных изделий с чернением.

Таблица 1.42 Состав медно-никелевых сплавов, имитирующих вид серебряных изделий

Марка сплава	Массовая доля элементов, %			
	Cu	Zn	Ni + Co	Примеси (не более)
Нейзильбер				
МНЦ15-20	Остальное	18-22	13,5-16,5	0,9
МН25	Остальное	-	24,0-26,0	1,3
МНЦ18-20	60-64	Остальное	17,0-19,0	0,6
Мельхиор				
МН19	Остальное	-	18,0-20,0	1,5
МНЦ12-24	62-66	Остальное	11,0-13,0	0,6
МНЦ18-27	53-56	Остальное	17,0-19,0	0,6

Примечание. Для улучшения жидкотекучести в сплавы вводят кремний.

К медно-никелевым сплавам, имитирующим по цвету серебро, также относятся сплавы, химический состав которых приведен в табл. 1.43.

Таблица 1.43 Сплавы, имитирующие по цвету серебро

n/n	Массовая доля элементов, %						
	Cu	Ni	чугун серый	Al	Sn	Pb	Fe
1	57	20	20	3	-	-	-
2	59	11	24,5	0,15	5	0,35	-
3	55	16	29	-	-	-	-
4	58	20	19	-	-	-	3
5	66	18	16	-	-	-	-
6	49	12	39	-	-	-	-
7	46	20	34	-	-	-	-
8	47	16	35	-	-	-	2

Алюминиевые сплавы. Алюминиевые сплавы при 20⁰С, имеют плотность около 2750 кг/м³ и характеризуются хорошими литейными и технологическими свойствами, обладают низкой склонностью к образованию усадочных раковин и трещин в отливках. Кроме того, алюминиевые сплавы имеют достаточно высокую удельную конструкционную прочность, коррозионную стойкость, теплопроводность, легко обрабатываются резанием, свариваемы.

Основными легирующими элементами алюминиевых сплавов являются: кремний, медь, магний и марганец.

Литейные алюминиевые сплавы классифицируют по химическому составу, выделяя их в отдельные группы. Химический состав алюминиевых сплавов приведен в табл. 1.44

Таблица 1.44
Химический состав алюминиевых сплавов (ГОСТ 1582-93)

Группа сплавов	Марка сплава	Массовая доля элементов, % (остальное – Al)					
		Mg	Si	Mn	Cu	Прочие	Примеси (не более)
1	2	3	4	5	6	7	8
I (Al-Si-Mg)	AK12 (АЛ2)	–	10–13	0,01–0,5	–	–	2,1 (2,1)
	AK13 (AK13)	0,01–0,2	11–13,5	0,1–0,5	–	–	1,35 (1,35)
	AK9ч (АЛ4)	0,2–0,35 (0,17–0,3)	8–10,5	0,2–0,5	–	–	1,1 (1,1)
	AK9пч (АЛ4-1)	0,25–0,35	9–10,5	0,2–0,35	–	0,08 (0,15) Ti	0,6
	AK9 (AK9)	0,25–0,45	8–11	0,2–0,5	–	–	2,4 (2,6)
	AK9с (AK9с)	0,2–0,35	8–10,5	0,2–0,5	–	–	1,35 (1,35)
	AK8л (АЛ34)	0,4–0,6 (0,35–0,55)	6,5–8,5	–	–	0,15–0,4 Be, 0,1 (0,3) Ti	0,9 (1,0)
	AK7 (AK7)	0,2–0,55 (0,2–0,5)	6–8	0,2–0,6	–	–	3,0 (3,1)
	AK7ч (АЛ9)	0,25–0,45 (0,2–0,4)	6–8	–	–	–	1,0 (1,1)
AK7пч (АЛ9-1)	0,25–0,45 (0,25–0,4)	7–8	–	–	0,08 (0,15) Ti	0,6	
II (Al-Si-Cu)	AK5M (АЛ5)	0,4–0,65 (0,35–0,6)	4,5–5,5	–	1,0–1,5	–	0,9 (1,0)
	AK5Mч (АЛ5-1)	0,45–0,6 (0,4–0,55)	4,5–5,5	–	1–1,5	0,08–0,15 Ti	0,6
	AK5M2 (AK5M2)	0,2–0,85 (0,2–0,8)	4–6	0,2–0,8	1,5–3,5	0,05–0,20 Ti	2,8 (2,8)
	AK5M7 (AK5M7)	0,3–0,6 (0,2–0,5)	4,5–6,5	–	6–8	–	2,6 (2,7)
	AK6M2 (AK6M2)	0,35–0,5 (0,3–0,45)	5,5–6,5	–	1,8–2,3	0,1–0,2 Ti	0,7
	AK6M (АЛ32)	0,3–0,5	7,5–9	0,3–0,5	1,0–1,5	0,1–0,3 Ti	0,8 (0,9)
	AK5M4 (AK5M4)	0,25–0,55 (0,2–0,5)	3,5–6,0	0,2–0,6	3,0–5,0	0,05–0,20 Ti	2,8 (2,8)
III (Al-Cu)	AK6M3ч (ВАЛ6)	0,25–0,50 (0,2–0,45)	7–8,5	–	2,5–3,5	0,1–0,25 Ti; 0,5–1,0 Zn; 0,005–0,1 В; 0,05–0,25 Be	0,6
	AM5 (АЛ19)	–	–	0,6–1,0	4,5–5,3	0,15–0,35 Ti	0,9
IV (Al-Mg)	AM4,5Kд (ВАЛ10)	–	–	0,35–0,8	4,5–5,1	0,15–0,35 Ti; 0,07–0,25 Cd	0,6
	AMr5K (АЛ13)	4,5–5,5	0,8–1,3	0,1–0,4	–	–	0,5 (0,6)
	AMr5Mц (АЛ28)	4,8–6,3	–	0,4–1,0	–	0,05–0,15 Ti	0,4 (0,5)
	AMr6л (АЛ23)	6–7	–	–	–	0,05–0,15 Ti; 0,02–0,1 Be; 0,05–0,2 Zr	0,5
V (сплавы сложного состава)	AMr6пч (АЛ23-1)	6–7	–	–	–	0,05–0,15 Ti; 0,02–0,1 Be; 0,05–0,2 Zr	0,2
	AMr10 (АЛ27)	9,5–10,5	–	–	–	0,05–0,15 Ti; 0,05–0,15 Be; 0,05–0,2 Zr	0,5

1	2	3	4	5	6	Окончание табл. 1.44	
IV (Al-Mg)	AMr10ч (АЛ27-1)	9,5–10,5	–	–	–	0,05–0,15 Ti; 0,05–0,15 Be; 0,05–0,2 Zr	0,2
	AMr11 (АЛ22)	10,5–13,0	0,8–1,2	–	–	0,05–0,15 Ti; 0,03–0,07 Be	0,5 (0,6)
V (сплавы сложного состава)	AK7Ц9 (АЛ11)	0,15–0,35 (0,1–0,3)	6–8	–	–	7–12 Zn	1,7 (1,7)
	АЦ4Mg (АЛ24)	1,55–2,05 (1,5–2,0)	–	0,2–0,5	–	0,1–0,2 Ti; 3,5–4,5 Zn	0,9

Примечание. Марка сплава без скобок относится к сплаву в чушках, в скобках указано обозначение сплава в отливках. При двойном словосочетании (в скобках и без скобок) – числовые значения в скобках относятся к сплаву в отливках, без скобок – в чушках. Суммарное количество примесей указано для сплавов, используемых в литье по выплавляемым моделям. При использовании сплавов марок AK12 (АЛ2) и AMr5Mц (АЛ28) для деталей, работающих в морской воде, массовая доля меди не должна превышать: в сплаве марки AK12 (АЛ2) – 0,30%, в сплаве марки AMr5Mц (АЛ28) – 0,10%. Сплавы марок AK5M7 (А5M7), AMr5K (АЛ13), AMr10 (АЛ27), AMr10ч (АЛ27-1) не рекомендуется использовать в новых конструкциях. Для модифицирования структуры в сплавы AK9ч (АЛ4), AK9пч (АЛ4-1), AK7ч (АЛ9), AK7пч (АЛ9-1) допускается введение стронция до 0,08%. В сплаве марки AMr11 (АЛ22) допускается отсутствие титана. Сплавы, предназначенные для изготовления изделий пищевого назначения, обозначаются буквой "П", которая ставится после обозначения марки сплава.

Влияние химических элементов на свойства сплавов системы Al-Si (силуминов) приведено в табл. 1.45.

Таблица 1.45
Влияние химических элементов на свойства сплавов системы Al-Si (силуминов)

Элемент	Характеристика
Zn	Повышает механические свойства при одновременном ухудшении литейных свойств.
Mg	Увеличивает пористость, значительно повышает механические свойства, повышает свариваемость и коррозионную стойкость сплава.
V, Cr, Mn, Co, Ni, Mo	Значительно понижают отрицательное действие железа на механические свойства, снижают пористость отливок, увеличивают жаропрочность сплава.
Ti	Повышает механическую прочность за счёт измельчения структуры.
Cu	Понижает коррозионную стойкость, повышает механические свойства.
B	Рафинирует сплав, измельчает структуру, повышает пластические свойства.
Be	Рафинирует сплав, понижает отрицательное воздействие железа на механические свойства, добавляется для уменьшения окисления при повышенных температурах. Небольшие добавки бериллия (0,01–0,05%) применяют для улучшения текучести.
Fe	Резко снижает пластичность, повышает жаропрочность сплава.
Ca	Восстанавливает алюминий из окислов, понижает жидкотекучесть, механические свойства, увеличивает теплопроводность сплава.
K, Li, Na	Измельчают структуру, значительно повышают вязкость расплава и пористость отливок.
Sn	Понижает коррозионную стойкость сплава.
Pb	Понижает эффект термической обработки.
Zr	Измельчает структуру, уменьшает пористость отливок, повышает механические свойства сплава.

Влияние химических элементов на свойства сплавов системы Al-Cu приведено в табл. 1.46.

Таблица 1.46
Влияние химических элементов на свойства сплавов системы Al-Cu

Элемент	Характеристика
Mg	Повышает прочностные и понижает пластические свойства.
Si	Существенно улучшает литейные свойства.
Zr	Измельчает структуру и понижает содержание газов в металле.
Ti	Измельчает структуру, чем способствует повышению механических свойств. Оптимальное содержание в сплавах 0,2–0,35% (по массе).
Fe	Повышает жаропрочность, но понижает механические свойства при нормальных температурах.
Ca, K, Li, Na	Увеличивает пористость отливок, ухудшает литейные свойства.
Mn	Повышает механические свойства.

Влияние химических элементов на свойства сплавов системы Al-Mg приведено в табл. 1.47.

Таблица 1.47
Влияние химических элементов на свойства сплавов системы Al-Mg

Элемент	Характеристика
Zn	В больших количествах повышает прочность и снижает пластичность.
Si	При понижении механических свойств повышает жидкотекучесть.
Mn	Понижает вредное влияние Fe на свойства сплавов, повышает коррозионную стойкость.
Ti	Повышает пластические свойства за счёт измельчения структуры.
Cu	Охрупчивает сплавы, понижает коррозионную стойкость и повышает жаропрочность.
B	Измельчает структуру и повышает механические свойства.
Be	Восстанавливает Al и Mg из окислов, понижает окисляемость сплавов и их пластичность, укрупняет структуру.
Fe, Ni	Понижают коррозионную стойкость и пластичность, повышают жаропрочность сплавов.
Ca, K, Li, Na, Sn, Pb	Резко увеличивают пористость в отливках, повышают вязкость сплавов. Sn понижает коррозионную стойкость. Sn и Pb снижают эффект термообработки сплавов.
Sb	Понижает коррозионную стойкость.

С целью повышения механических свойств и стабилизации размеров литых деталей все отливки из алюминиевых сплавов подвергают соответствующей термической обработке.

Обобщённые режимы термической обработки отливок из алюминиевых сплавов и их механические свойства после термической обработки приведены в табл. 1.48 и табл. 1.49 соответственно.

Более подробная информация об алюминиевых сплавах и режимах их термической обработки приведена в ГОСТ 1583-93.

Обобщённые режимы термической обработки отливок из алюминиевых сплавов

Таблица 1.48

Обозначение режима	Термическая обработка*				Назначение термообработки
	вид	температура нагрева, °С	время выдержки, ч	охлаждающая среда	
T1	Искусственное старение без предварительной закалки	175±5	5–17	Воздух	Улучшение обрабатываемости резанием. Для сплава АК5М – повышение прочности.
T2	Отжиг	300±10	2–4	Воздух	Снятие или уменьшение литейных и термических напряжений, повышение пластичности
T4	Закалка	535±5	2–12	Вода (20–50°С)	Повышение прочности. Увеличение коррозионной стойкости отливок, работающих при температурах не более 100°С.
T5	Закалка	535±5	3–5	Вода (20–100°С)	Повышение прочности и сохранение повышенной пластичности.
	Кратковременное (неполное) искусственное старение	175±5	5–10	Воздух	
T6	Закалка	535±5	2–6	Вода (20–100°С)	Получение максимальной прочности при некотором снижении пластичности.
	Полное искусственное старение	175±5	10–15	Воздух	
T7	Закалка	535±5	2–6	Вода (80–100°С)	Повышение прочности и стабильности структуры.
	Стабилизирующий отпуск	225±10	3–5	Воздух	
T8	Закалка	535±5	3–5	Вода (20–100°С)	Получение повышенной пластичности и стабильности размеров отливок при понижении прочности.
	Смягчающий отжиг	250±10	3–5	Воздух	

Примечание. * – см. ГОСТ 1583-93.

Таблица 1.49

Механические свойства алюминиевых сплавов после термобработки
(для отливок, полученных методом литья по выплавляемым моделям)

Группа сплава	Марка сплава	Модифицирование сплава	Вид термической обработки	Механические свойства			
				σв, МПа	δ, %	НВ	
							не менее
I	AK12 (AL2)	M	—	147	4,0	50	
		M	T2	137	4,0	50	
	AK9 (AK9)	—	—	157	1,0	60	
		M	T6	235	1,0	80	
	AK9ч (AL4)	—	—	147	2,0	50	
		M	T6	225	3,0	70	
	AK9пч (AL4-1)	—	—	157	3,0	50	
		M	T6	245	3,5	70	
	AK7ч (AL9)	—	—	157	2,0	50	
		—	T2	137	2,0	45	
		—	T4	176	4,0	50	
		—	T5	196	2,0	60	
		M	T5	196	2,0	60	
		M	T6	225	1,0	70	
		M	T7	196	2,0	60	
		M	T8	157	3,0	55	
		AK7пч (AL9-1)	—	T4	196	5,0	50
			—	T5	235	4,0	60
	M		T5	235	4,0	60	
	M		T6	274	2,0	70	
M	T6		294	3,0	70		
M	T7		206	2,5	60		
M	T8		167	3,5	55		
AK5M (AL5)	—		T1	157	0,5	65	
	—	T5	196	0,5	70		
	—	T6	225	0,5	70		
	—	T7	176	1,0	65		
	—	T1	176	1,0	65		
	—	T5	274	1,0	70		
AK5Mч (AL5-1)	—	T7	206	1,5	65		
	—	T5	345	2,0	90		
AK8M3ч (BAL6)	—	T4	294	8,0	70		
	—	T5	333	4,0	90		
	—	T4	294	10	70		
AM5 (AL19)	—	T5	392	7,0	90		
	—	T6	421	4,0	110		
	AM4,5Кд (BAL10)	—	—	147	1,0	55	
—		—	196	4,0	55		
—		—	186	4,0	60		
—		T4	225	6,0	60		
—		T4	245	10,0	60		
AM7 (AL22)	—	—	176	1,0	90		
	—	—	225	1,5	90		
	—	—	196	2,0	80		
	—	T2	216	2,0	80		
	—	—	216	2,0	60		
AK7Ц9 (AL11)	—	—	265	2,0	70		
	—	—	265	2,0	70		

Примечание. М — сплав модифицирован.

Технологические свойства алюминиевых сплавов приведены в табл. 1.50 [170].

Технологические свойства алюминиевых сплавов

Таблица 1.50

Марка	Интервал кристаллизации, °С	Относительная жидкотекучесть ¹	Усадка, %		Склонность к образованию горячих трещин по пробе ВИАМ, мм	Герметичность ²
			линейная	объёмная		
AK12 (AL2)	591-577	1	0,90-1,00	3,0-3,5	Не образуются	3/12 (разрыв)
AK9ч (AL4)	594-567	0,75	1,0-1,1	3,2-3,4	Не образуются	3/20 (разрыв)
AK7ч (AL9)	616-570	0,73	1,1-1,2	3,7-3,9	5	3/14 (разрыв)
AK5M (AL5)	627-570	0,72	1,15-1,2	4,5-4,9	7,5	3/10 (разрыв)
AM5 (AL19)	644-535	0,43	1,25	6,0	32,5	0,5/3,5 (течь)
AM75K (AL13)	622-585	0,67	1,25-1,30	—	12,5	—
AM75Mц (AL28)	—	0,64	—	—	17,5	—
AM76Л (AL23)	—	0,55	1,1	—	15	—
AK7Ц9 (AL11)	585-551	—	1,2-1,4	4,0-4,5	5	3/15 (разрыв)

Примечание. ¹ — данные по прутковой пробе (температура заливки сплавов 700°С), полученной в песчано-глинистой форме, относительно жидкотекучести сплава AK12 (AL2). Обработка данных [170]. ² — в числителе — давление газа (максимальное давление газа — 3,0 МПа), в знаменателе — давление воды. Герметичность характеризуется минимальным давлением, при котором в дне отливки, выполненной в форме стакана с толщиной стенки 4 мм, появляется течь. Разрыв — разрушение отливки под давлением воды, без течи, характеризует гидропрочность.

Характеристика и область применения отливок из наиболее применяемых в литье по выплавляемым моделям алюминиевых сплавов приведена в табл. 1.51.

Таблица 1.51

Характеристика и область применения отливок из алюминиевых сплавов

Марка сплава	Свойства сплавов	Область применения
1	2	3
AK12 (AL2)	Высокие литейные и технологические свойства (высокая жидкотекучесть, малая линейная усадка, не даёт горячих трещин, высокая герметичность). Хорошая коррозионная стойкость, минимальное снижение прочности по мере увеличения массивности стенок отливок. Удовлетворительная жаропрочность. Хорошая свариваемость. Термически не упрочняется. Невысокая механическая прочность. Сплав склонен к образованию крупной газовой пористости и концентрированных усадочных раковин в термических узлах отливок. Плохая обрабатываемость резанием.	Малонагруженное, тонкостенное, ажурное литье повышенной герметичности, работающее при температурах до 200°С.
AK9ч (AL4)	Высокие литейные и технологические свойства (жидкотекучесть, герметичность, трещиностойкость), удовлетворительная коррозионная стойкость, механическая прочность, жаропрочность. Повышенная газовая пористость в отливках. Хорошая свариваемость и удовлетворительная обрабатываемость резанием.	Крупные и сложные по конфигурации детали средней нагруженности, работающие при температурах до 225°С.

1	2	3
AK5M (AL15)	Удовлетворительные литейные и технологические свойства, высокая механическая прочность и пониженная пластичность (ниже, чем у сплава АК9ч). Менее, чем сплавы АК12 и АК9ч, склонен к образованию газовой пористости. Удовлетворительная свариваемость и коррозионная стойкость. Обрабатываемость резанием выше, чем у сплава АК9ч.	Крупные и сложные по конфигурации детали большой нагруженности, работающие при температурах до 250°C.
AK7ч (AL9)	Хорошие литейные и технологические свойства (не склонен к трещинообразованию в процессе кристаллизации и последующего охлаждения, низкая линейная усадка), коррозионная стойкость, жаропрочность. Удовлетворительная коррозионная стойкость и обрабатываемость резанием. По механической прочности уступает сплаву АК9ч. По обрабатываемости резанием и прочет превосходит сплав АК12. применяется как в модифицированном, так и в не модифицированном состоянии.	Является заменителем сплавов АК12. Детали любой сложности для самолетов, приборов, корпусов помп и т.п., требующие повышенной пластичности и работающие при температурах до 200°C.
AK7Ц9 (AL11)	Высокие литейные и технологические свойства. По сравнению со сплавом AL4 имеет пониженную пластичность. Обрабатываемость резанием выше, чем у сплава АК9ч.	Детали сложной конфигурации, требующие повышенной пластичности и работающие при температурах до 250°C.
Amг5K (AL13)	Повышенные литейные и технологические свойства, механические свойства, коррозионная стойкость.	Детали любой сложности, работающие в суровых атмосферных условиях или при температурах до 225°C.

Для изготовления фасонных отливок используют магниевые сплавы, которые можно объединить в три группы: сплавы магния с алюминием и цинком, сплавы магния с цинком и цирконием, а также сплавы магния, легированные P3M.

Сплавы группы Mg-Al-Zn относят к числу высокопрочных, которые предназначены для производства высоконагруженных отливок, работающих в атмосфере с большой влажностью. Для повышения коррозионной стойкости в сплавы вводят 0,1...0,5% марганца, а для снижения окисляемости – 0,001...0,002% бериллия или 0,5...0,1% кальция.

Основным упрочняющим элементом данных сплавов является алюминий, растворимость которого в магнии, при эвтектической температуре составляет 17,4%, а при комнатной температуре – 2,8%. Цинк повышает технологические свойства сплавов и способствует увеличению прочности сплавов.

Сплавы группы Mg-Zn-Zr также относят к числу высокопрочных. Эти сплавы, от магниевых сплавов других групп, отличаются повышенные механические свойства и хорошая обрабатываемость резанием. Легирование сплавов лантаном улучшает литейные свойства, несколько повышает жаропрочность и свариваемость, но снижает прочность и пластичность при комнатной температуре. Сплавы данной группы характеризуются удовлетворительными литейными свойствами, мелкозернистой и однородной структурой в стенках отливок различной толщины и способностью упрочняться при термической обработке. Литые детали, изготовленные из данных сплавов, работают при 200...250°C и высоких нагрузках.

Сплавы группы Mg-P3M-Zr обладают высокой жаропрочностью и хорошей коррозионной стойкостью. Литые детали из этих сплавов предназначены для длительной работы при 250...350°C и кратковременной работы при 400°C. Сплавы характеризуются хорошими литейными свойствами, обеспечивают высокую герметичность литых деталей, малую склонность к образованию микрорыхлот и усадочных трещин в отливках, высокие и однородные механические свойства в сечениях стенок отливок, различных по толщине. Сплавы с P3M используют для изготовления отливок, работающих под воздействием статических и усталостных нагрузок.

Химический состав магниевых сплавов приведен в табл. 1.52.

Таблица 1.52

Химический состав магниевых сплавов (ГОСТ 2856-79)

Марка сплава	Массовая доля элементов, % (остальное – Mg)					
	Al	Mn	Zn	Zr	Прочие	Примеси, % (не более)
МЛЗ	2,5–3,5	0,15–0,5	0,5–1,5	–	–	0,5
МЛ4	5,0–7,0	0,15–0,5	2,0–3,5	–	–	0,5
МЛ4пч	5,0–7,0	0,15–0,5	2,0–3,5	–	–	0,13
МЛ5	7,5–9,0	0,15–0,5	0,2–0,8	–	–	0,5
МЛ5пч	7,5–9,0	0,15–0,5	0,2–0,8	–	–	0,13
МЛ5он	7,5–9,0	0,15–0,5	0,2–0,8	–	–	0,7
МЛ6	9,0–10,2	0,10–0,5	0,6–1,2	–	–	0,5
МЛ8	–	–	5,5–6,6	0,7–1,1	0,2–0,8 Cd	0,2
МЛ9	–	–	–	0,4–1,0	1,9–2,6 Nd; 0,2–0,8 In	0,35
МЛ10	–	–	0,1–0,7	0,4–1,0	2,2–2,8 Nd	0,2
МЛ11	–	–	0,2–0,7	0,4–1,0	2,5–4,0	0,2
МЛ12	–	–	4,0–5,0	0,6–1,1	–	0,2
МЛ15	–	–	4,0–5,0	0,7–1,1	0,6–1,2 La	0,2
МЛ19	–	–	0,1–0,6	0,4–1,0	1,6–2,3 Nd; 1,4–2,2 Y	0,25

Магниевые сплавы. Магниевые сплавы, по сравнению с другими сплавами, обладают следующими преимуществами:

- низкой плотностью (плотность при 20°C 1780...1830 кг/м³);
- высокой удельной прочностью и удельной жесткостью;
- способностью хорошо поглощать вибрацию;
- хорошей обрабатываемостью резанием;
- удовлетворительной свариваемостью и паяемостью.

Вышечисленные свойства магниевых сплавов предопределили основные области применения литых деталей из магниевых сплавов – в аэрокосмической технике, в текстильном машиностроении, в автомобильной промышленности, в приборостроении и т. д.

К недостаткам магниевых сплавов относятся: меньшая, чем у алюминиевых сплавов, коррозионная стойкость, трудности при выплавке и литье (газонасыщение, пористость, окисление и др.).

Магниевые сплавы классифицируют по химическому составу (на основе базовых диаграмм состояния) и температурной области применения.

Основными легирующими элементами магниевых сплавов являются: алюминий, марганец, цинк, цирконий, P3M. В основную группу магниевых сплавов входят сплавы систем: Mg-Al-Zn (наиболее используемая группа сплавов), Mg-Zn-Zr, Mg-P3M-Zr. Ограниченно используют сплавы систем Mg-Li (сверхлегкие), Mg-Mn (коррозионно-стойкие), Mg-Th (жаропрочные).

По температурной области применения, магниевые сплавы делят на сплавы, работающие при криогенных температурах, при нормальной (комнатной) температуре, в интервале температур от 20 до 200°C, при температурах от 250 до 300°C.

Как видно из данных, приведенных в табл. 1.52, алюминий и цинк являются основными легирующими элементами магниевых сплавов. Эти химические элементы образуют в магниевых сплавах интерметаллидные соединения MgZn и Al₂Mg₃, чем способствуют упрочнению сплавов. Для повышения коррозионной стойкости в магниевые сплавы вводят марганец.

Описание влияния химических элементов на свойства магниевых сплавов приведено в табл. 1.53.

Таблица 1.53
Влияние химических элементов на свойства магниевых сплавов.

Элемент	Характеристика
Al	В сплавах системы Mg-Al-Zn повышает механические свойства. В сплавах, содержащих Zr, понижает механические свойства.
B, Ti	Измельчают структуру.
Cd	Повышает механические свойства сплавов системы Mg-Zn-Zr.
Ca	При содержании более 0,01% понижает окисляемость. При комнатной температуре понижает механические свойства. Повышает жаропрочность сплавов системы Mg-Al-Zn.
Zn	В сплавах системы Mg-Zn-Zr повышает механические свойства при комнатной температуре.
Zr	За счёт измельчения структурных составляющих повышает механические свойства сплавов системы Mg-Zn и Mg-Nd при комнатной температуре (добавка 0,5–0,7% Zr уменьшает размер зерна в 80–100 раз). Осаждает примеси железа и кремния, тем самым повышая коррозионную стойкость. Снижает вредное влияние примеси Ni на свойства сплавов.
Ag	Повышает механические свойства.
Be	В сплавах системы Mg-Al-Zn при содержании от 0,0005 до 0,02% понижает окисляемость расплавов. При содержании более 0,02% понижает механические свойства, повышает склонность сплава к образованию горячих трещин в отливках.
Cu	Понижает коррозионную стойкость при содержании более 0,1%.
Mn	Повышает коррозионную стойкость и механические свойства. Снижает вредное влияние примесей Fe и Ni на свойства сплавов.
Th, Ce	Повышает жаропрочность.
Ne	У сплавов, содержащих цирконий, повышает жаропрочность.
La	Повышает жаропрочность.
Fe, Ni	Резко снижают коррозионную стойкость сплавов.
Na, K, Li	Повышают окисляемость, снижают коррозионную стойкость сплавов.
Si	Понижает коррозионную стойкость и механические свойства сплавов, содержащих цирконий. При содержании более 0,03% улучшает жидкотекучесть сплавов системы Mg-Al-Zn.
Cl	Резко снижает коррозионную стойкость.

Таблица 1.54

Режимы термической обработки отливок из магниевых сплавов

Обозначение режима	Марка сплава	Вид термической обработки	Закалка				Назначение
			Первая ступень		Вторая ступень		
			Температура, °C	Время, ч	Температура, °C	Время, ч	
T1	МЛ12 МЛ15	Искусственное старение	-	-	-	-	Повышение механических свойств
			-	-	-	-	
T2	МЛ5	Отжиг	-	-	-	-	Снятие остаточных напряжений
			-	-	-	-	
T4	МЛ5ч МЛ4 МЛ6	Закалка	415	12–24	-	-	Повышение механических свойств
			380	8–16	410	21–29	
			360	21–29	410	21–29	
	МЛ4ч МЛ5он МЛ6	Закалка	415	12–24	410	21–29	Повышение механических свойств
			380	8–16	410	21–29	
			360	3	490	5	
T6	МЛ8 МЛ9 МЛ10 МЛ11 МЛ19	Закалка	420	8–12	-	-	Повышение прочности
			540	8–12	-	-	
			540	8–12	-	-	
			535	4–8	-	-	
T61	МЛ6 МЛ8 МЛ10 МЛ19	Закалка и старение	360	3	410	21–29	Повышение прочности
			420	1–3	490	5	
			545	4–8	425	8	
			400	1–3	425	8	

В табл. 1.54 приведены режимы термообработки отливок из магниевых сплавов, а в табл. 1.55 приведены механические и некоторые технологические свойства магниевых сплавов. Свойства и область применения отливок из магниевых сплавов приведены в табл. 1.56.

Механические и технологические свойства
магневых сплавов при литье в песчаные формы

Таблица 1.55

Марка сплава	Интервал кристаллизации, °С	Относительная жидкотекучесть*	Усадка, %		ТР, мм	Вид термической обработки	σв, МПа		δ, %	
			линейная	объемная			не менее		не менее	
МЛЗ	628-561	1	1,4-1,6	4,8	42,5	-	160	6		
МЛ4	610-400	1,14	1,2-1,4	3,8	37,5	-	159	3		
						T4	220	5		
						T6	230	2		
МЛ5	607-430	1,35	1,0-1,2	3,4	30,0	-	147	2		
						T4	147	2		
						T6	225	5		
МЛ5оч	607-430	1,35	1,0-1,2	3,4	30,0	-	147	2		
						T4	215	5		
						T6	225	2		
МЛ6	600-440	1,53	1,1-1,2	3,6	27,5	-	147	1		
						T4	215	4		
						T6	215	1		
МЛ8		1,35	1,2-1,4	3,8	32,5	T6	264	4		
						T61	275	4		
						T6	226	4		
МЛ9	640-550	1,16	1,2-1,5	3,9	17,5	T6	226	4		
МЛ10	640-550	1,16	1,2-1,5	3,9	17,5	T6	226	3		
МЛ11	648-593	1,16	1,2-1,5	3,9	20,0	-	118	1,5		
						T2	118	1,5		
						T4	137	3		
МЛ12	653-550	1,30	1,2-1,4	3,8	32,5	-	196	6		
						T1	226	5		
						T1	206	3		
МЛ15	631-539	1,39	1,2-1,5	3,9	27,5	T6	216	3		
МЛ19						T6	216	3		

Примечание. ТР – склонность к образованию горячих трещин по пробе ВИАМ. * – данные по прутковой пробе, полученной в песчано-глинистой форме, относительно жидкотекучести сплава МЛЗ. Обработка данных [108; 170].

Таблица 1.56

Свойства и область применения отливок из магневых сплавов

Марка сплава	Свойства сплава	Область применения
1	2	3
МЛЗ	Низкая жидкотекучесть, относительно высокий коэффициент усадки, повышенная склонность к образованию горячих трещин. Повышенная герметичность, не склонен к образованию микрорыхлот. Удовлетворительная коррозионная стойкость. Низкий предел текучести, высокая пластичность. Не требует термической обработки.	Детали несложной конфигурации с повышенной герметичностью. Средненагруженные детали, работающие в атмосфере с большой влажностью. Детали, работающие при температурах до 150°C.

Окончание табл. 1.56

1	2	3
МЛ4, МЛ4пч	Удовлетворительные литейные свойства. Сплавы склонны к образованию горячих трещин и микрорыхлот. Повышенная чувствительность механических свойств к толщине стенок отливок. Пониженная герметичность. Требуется использование холодильников в массивных частях отливок. Сплав МЛ4 после оксидирования имеет удовлетворительную коррозионную стойкость. Сплав МЛ4пч имеет хорошую коррозионную стойкость. Высокие механические свойства.	Детали, работающие в условиях статических и динамических нагрузок. Возможно применение средненагруженных деталей без термической обработки. Детали, работающие при температурах до 150°C.
МЛ5, МЛ5пч	Удовлетворительные литейные и технологические свойства (высокая жидкотекучесть, склонны к образованию горячих трещин, микрорыхлот). Обладают меньшей, чем сплав МЛ4, окисляемостью. Высокие механические свойства. Сплав МЛ5 в оксидированном состоянии обладает удовлетворительной коррозионной стойкостью. Сплав МЛ5пч обладает хорошей коррозионной стойкостью. Свариваемость удовлетворительная.	Высоконагруженные детали, работающие при температурах до 150°C и кратковременном нагреве до 250°C. Детали из МЛ5пч эксплуатируются в условиях тропического или морского климата.
МЛ6	Хорошие литейные и технологические свойства. Менее, чем сплавы МЛ4 и МЛ5, склонен к образованию микрорыхлот и горячих трещин. Высокие механические свойства. Удовлетворительная свариваемость и коррозионная стойкость.	Высоко- и средненагруженные детали. Целесообразно применять для деталей, требующих повышенного предела текучести. Детали, работающие при температурах до 150°C и кратковременном нагреве до 250°C.
МЛ8	Высокопрочный сплав. Высокие механические свойства и усталостная прочность. Однородность механических свойств в тонкостенных и массивных сечениях отливок.	Высоконагруженные детали, требующие усталостной прочности, а также детали, работающие при температурах до 150°C и кратковременном нагреве до 200°C.
МЛ12	То же, что и МЛ8, но обладает большей жаропрочностью.	Высоконагруженные детали, требующие усталостной прочности, а также детали, работающие при температурах до 200°C и кратковременном нагреве до 250°C. Обладают повышенной усталостной прочностью и коррозионной стойкостью.
МЛ15	То же, что и МЛ12, но обладает большей жаропрочностью.	Высоконагруженные детали, требующие усталостной прочности, а также детали, работающие при температурах до 200°C и кратковременном нагреве до 350°C.
МЛ11	Жаростойкий сплав. Высокие механические свойства при повышенных температурах, повышенная герметичность. Низкие механические свойства при комнатной температуре, низкая пластичность. Хорошая жидкотекучесть, низкая склонность к образованию горячих трещин.	Детали средней нагруженности с температурой эксплуатации до 250°C.
МЛ10	То же, что и МЛ11. Характеризуются повышенной жаропрочностью и коррозионной стойкостью.	Нагруженные детали, к которым предъявляются требования по стабильности размеров при рабочих температурах до 250°C и кратковременном нагреве до 350°C. Детали авиационной и автомобильной промышленности.
МЛ19	То же, что и МЛ11. Характеризуются повышенной жаропрочностью и коррозионной стойкостью.	То же, что и МЛ10, но кратковременный нагрев до 400°C. Детали авиационной и автомобильной промышленности.

В литье по выплавляемым моделям наиболее распространение в настоящее время нашли сплавы МЛ4, МЛ5, МЛ6, МЛ10, МЛ12 и МЛ15. Достоинством магниевых сплавов является их малая плотность и относительно высокие механические свойства. Основным недостатком магниевых сплавов является их неудовлетворительная коррозионная стойкость в морской и пресной воде.

Никелевые сплавы. Никель и его сплавы обладают высокими механическими и определенными ферромагнитными свойствами. Никелевые сплавы стойки против коррозии в атмосферных условиях, в пресной и морской воде, различных органических средах. Для современного машиностроения основная ценность никелевых сплавов заключается в их высокой жаропрочности.

Основными легирующими элементами никелевых сплавов являются Cu, Cr и Mn. Железо в никелевых сплавах является нейтральной примесью, а углерод в количествах до 0,3% выполняет функции раскислителя. К числу примесей, вызывающих хрупкость никеля и его сплавов, относятся Pb, As, Sb, Bi, O, P. Бор в количестве 0,1...0,3%, вводят для измельчения структуры сплавов и улучшения их технологических свойств.

Никелевые сплавы классифицируют на коррозионностойкие, жаростойкие, жаропрочные и сплавы со специальными физическими свойствами. Жаропрочные никелевые сплавы разделяют по назначению: для отливок с равномерной макроструктурой, направленно-столбчатой и монокристаллической, в том числе сплавы безуглеродистые и коррозионностойкие. В зависимости от используемых шихтовых материалов жаропрочные сплавы разделяют на: сплавы, полученные из свежих шихтовых компонентов, сплавы, полученные с применением возвратного собственного производства отливок, сплавы, полученные с использованием лома жаропрочных сплавов (обрезь и отходы сплава из механических цехов).

Коррозионностойкие сплавы. Сплавы типа монель (основа Ni-Cu) характеризуются высокой коррозионной стойкостью в различных средах. Детали из таких сплавов используют в судостроении, химической и нефтяной промышленности. Для улучшения литейных свойств, повышения прочности и твердости в сплав вводят 3...4% кремния. К числу коррозионностойких также относятся никелевые сплавы, легированные титаном, алюминием, бериллием.

Хастелой – общее название группы коррозионностойких сплавов системы Ni – Mo и Ni – Cr – Mo. В зависимости от желательного сочетания свойств, сплавы типа хастелой содержат различное количество Mo (до 30%), Cr (до 23%), Fe (до 29%), C (до 0,15%). Некоторые марки хастелой легируют W (около 5%), Si (до 10%), Co (до 2,5%), а также Cu, V, Ta, Nb и другими химическими элементами. Для этих сплавов характерна повышенная кислотостойкость, стойкость в средах, содержащих ионы хлора, фтора и т.д. Сплавы применяют для изготовления литых деталей химической аппаратуры.

Жаростойкие сплавы. Жаростойкие никелевые сплавы, как правило, имеют двухкомпонентную основу Ni-Cr с содержанием хрома 15...20%. Двойные Ni-Cr сплавы получили название – нихром. Нихром обладает высокой окислительной стойкостью, что позволяет использовать детали из него для работы в условиях кратковременных, высоких механических напряжений, при высоких температурах. Из нихрома изготавливают отливки жаростойкой арматуры и печного оборудования. С увеличением содержания хрома жаростойкость нихромового сплава повышается. Например, при содержании Cr 10...13% жаростойкость сплава достигает 750°C, а при содержании Cr 20...25% и более 30% жаростойкость сплава повышается до 1100 и 1250°C соответственно. Для улучшения окислительной стойкости и прочности в сплав дополнительно вводят алюминий и кремний. Нихром имеет хорошие литейные свойства, склонен к ликвации, имеет свободную линейную усадку 1,9...2,0%.

Жаропрочные сплавы. Жаропрочные никелевые сплавы, также как и жаростойкие сплавы, имеют Ni-Cr основу, но являются многокомпонентными гетерофазными системами, которые состоят из матрицы (γ -фазы) и γ' -фазы, что обеспечено легическими элементами. То есть матрица жаропрочных никелевых сплавов представляет собой сложнелегированный твердый раствор на никелевой основе, а γ' -фаза – это сложнелегированный никелевый жаропрочный сплав. В жаропрочных сплавах могут присутствовать карбиды типа MC, M₂₃C₆ и M₆C, карбонитриды, σ -фаза и др.

Наличие γ' -фазы в структуре никелевых сплавов повышает их жаропрочность и одновременно придает сплавам склонность к образованию горячих трещин при сварке и термической обработке, необходимость в термической обработке деталей после сварки или подварки технологических, а также эксплуатационных дефектов.

Температурные ограничения применения жаропрочных сплавов с дисперсионными γ' -фазами и падением жаропрочности при перегревах деталей в процессе эксплуатации.

Говоря о никелевых сплавах, следует отметить значительное отрицательное влияние примесей легкоплавких цветных металлов на их жаропрочность. Присутствие к резкому понижению жаропрочности сплавов.

В качестве примера на рис. 1.6 представлены гистограммы относительного понижения длительной прочности сплава ЭИ437 (Состав сплава ЭИ437: Ni – основа; C≤0,06%; Si≤0,6%; Mn≤0,4%; Cr=19...22%; Ti=2,3...2,7%; Al=0,55...0,95%; Fe≤1,0%; Ce≤0,01%; S≤0,007%; P≤0,015%) от содержания в нём примесей легкоплавких цветных металлов (испытания на длительную прочность были проведены при 700 °C и напряжениях 25, 36 и 42 МПа). Для построения гистограмм, представленных на рис. 1.6, за единицу длительной прочности сплава была принята прочность сплава с меньшим содержанием в нём каждого конкретного легкоплавкого цветного металла. Цифры в колонках гистограммы (см. рис. 1.6) означают содержание данного металла в сплаве, в %, по массе.

То есть (см. рис. 1.6), например, при увеличении в сплаве ЭИ437 содержания Sb с 0,001% до 0,002%, при всех прочих равных условиях, длительная прочность сплава уменьшится практически в два раза, а при увеличении в сплаве содержания Sn с 0,0026% до 0,0080% длительная прочность сплава уменьшится в десять раз.

Неуклонно повышающиеся требования к качеству и свойствам литых деталей и сплавов, используемых, в частности, для производства турбинных лопаток, привели к необходимости получения литых деталей с различной макроструктурой (равноосной, направленно-столбчатой, монокристаллической) и, соответственно, появлению новых классов жаропрочных никелевых сплавов.

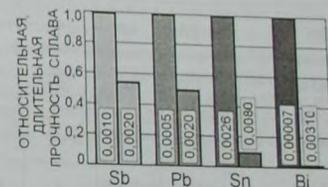


Рис. 1.6. Относительная длительная прочность жаропрочного никелевого сплава ЭИ437 от содержания в нём примесей легкоплавких цветных металлов (обработка данных [307])

Химический состав и свойства некоторых наиболее известных никелевых сплавов, используемых для получения отливок с равноосной макроструктурой, приведены в табл. 1.57 и табл. 1.58 соответственно.

Химический состав никелевых сплавов

Таблица 1.57

Марка сплава	Массовая доля элементов, % (остальное – Ni)						
	Cr	C	Ti	Al	W	Mo	Прочие
ХН77ТЮ	19–22	0,06	2,3–2,7	0,55–0,95	–	–	–
ХН73МБТЮ	13–16	0,08	2,35–2,7	1,3–1,7	–	2,8–3,2	1,8–2,2 V
ХН55ВМТФКЮ	9–12	0,12	1,4–2,0	3,6–4,5	4,5–6,5	4–6	0,1 В; 12–16 Со
ЖС-3	14–18	0,11–0,16	1,6–2,3	1,6–2,2	4,4–6,5	3–4,5	0,2–0,8 V
ЖС-6	11,5–13	0,11–0,18	2,2–2,8	4,7–5,5	6–8	4–5,5	–
ЖС-6К	10,5–12,5	0,13–0,2	2,5–3,0	5–6	4,5–5,5	3,5–4,5	4–5 Со; Zr ≤ 0,04; B ≤ 0,015
АНВ-300	14–17	≤ 0,10	1,4–2,0	4,5–5,5	7–10	–	Si ≤ 0,5; Mn ≤ 0,5; Fe ≤ 1,5; B ≤ 0,01; S ≤ 0,015; P ≤ 0,01
ВЖ36Л	10–12	–	0,4–0,7	3,5–5,2	7–9	3,7–4,5	V ≤ 1,1; Fe ≤ 1,5
ВЖЛ-12У*	9,5	0,18	4,5	5,4	1,4	3,1	14 Со; 0,75 Nb; Zr ≤ 0,02; B ≤ 0,011; 0,8 V
ЖС-3ДК*	12,5	0,09	2,9	4,5	4,3	4,3	7,5 Со; B ≤ 0,015; Si ≤ 0,4; Fe ≤ 2; S ≤ 0,01; P ≤ 0,015
ВЖЛ-12Э*	9,4	0,18	4,5	5,4	1,5	3,1	9 Со; 0,75 Nb; Zr ≤ 0,02; B ≤ 0,011; 0,75 V
ВКНА-4	4,5–5,5	0,15–0,20	–	8,5–9,5	1,6–2,2	2,0–3,0	6–8 Со; 0,003 В; 1,0–1,3 Zr
IN100*	10,0	0,18	4,7	5,5	–	3,0	15 Со; 1 V; Zr ≤ 0,06; B ≤ 0,014;
В1900*	8,0	0,10	1,0	6,0	–	6,0	10 Со; 4 Та; Zr ≤ 0,10; B ≤ 0,015
MAR M200*	9,0	0,15	2,0	5,0	12,5	–	10 Со; 1,8 Nb; Zr ≤ 0,05; B ≤ 0,015
Х20Н80	20–23	–	–	–	–	–	0,4–1,5 Si
Х15Н75Ж	15	–	–	–	–	–	5 Fe
Монель**	–	До 0,2	–	–	–	–	27–29 Cu; 2–3 Fe; 1,2–1,8 Mn
Монель кремнистая	–	До 0,12	–	–	–	–	4,2 Si; 1,0 Mn; 3,5 Fe; 30 Cu
Хастеллой Д	–	–	–	–	–	–	11,0 Si
Хастеллой	–	0,16	–	–	–	19	1,0 Si; 1,7 Mn; 20 Fe

Примечание. * – средние значения, ** – НМЖИЦ 28–2,5–1,5

Свойства некоторых жаропрочных никелевых сплавов (плавка, заливка и кристаллизация в вакууме)

Таблица 1.58

Марка сплава	Термическая обработка	Температура испытаний, °С	Механические свойства (не менее)						Свободная линейная усадка, %
			σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	σ ₁₀₀ , МПа	δ, %	φ, %	A _н , кДж/м ²	
ЖС3-ДК	Нагрев в вакууме до (1215±15)°С, выдержка 3–4 ч, охлаждение в вакууме.	20	900	800	–	5	8	300	2,3
		900	700	500	290	6	8	–	
ЖС-6К	Нагрев в вакууме до (1215±15)°С, выдержка 4 ч, охлаждение в вакууме.	20	900	830	–	1,7	6	100	2,3
		900	800	500	320	5	8	–	
ЖС-3	1150°С, выдержка 7 ч, охлаждение на воздухе	20	750	–	–	8,5	14	200	2,3
		900	410	–	–	4	7	–	
ЖС-6	1200°С, выдержка 4 ч, охлаждение на воздухе	20	1020	–	–	1	2	300	2,2
		900	790	–	–	2,5	3	–	
АНВ-300	Закалка при 1120°С, охлаждение на воздухе	20	880	–	–	–	–	–	–
		850	720	–	–	–	–	–	

Сплавы на основе никеля характеризуются различным уровнем технологичности и величиной температурного интервала кристаллизации, а качество отливок, изготавливаемых из никелевых сплавов, весьма чувствительно к условиям затвердевания расплава в форме. В качестве примера, в табл. 1.59 приведены сравнительные статистические данные по трещинообразованию в условиях затруднённой усадки сплавов ЖС-6К, ЖС-6У, ВЖЛ-12У, залитых в КО с различной начальной температурой, а в табл. 1.60 приведены температурные интервалы кристаллизации некоторых никелевых сплавов [99].

Таблица 1.59
Вероятность появления трещин в отливках, в условиях затруднённой усадки сплавов ЖС-6К, ЖС-6У, ВЖЛ-12У

Марка сплава	Начальная температура КО при заливке, °С	Вероятность трещинообразования, %
	1050	1
ЖС-6У	950	9
	1050	2
ВЖЛ-12У	950	15
	1050	3
	1150	1

Таблица 1.60
Температурный интервал кристаллизации никелевых сплавов

Марка сплава	t _с , °С	t _н , °С	Δt _с , °С
Х20Н80	1394	1436	42
ЖС-6К	1320	1370	50
ЖС-6У	1295	1360	65
ВЖЛ-12У	1260	1335	75

Жаропрочные никелевые сплавы для направленной кристаллизации отливок. Методом направленной кристаллизации получают отливки с направленно-столбчатой, монокристаллической и эвтектической макроструктурой, преимущественно работающие в газотурбинных двигателях (ГТД) и установках (ГТУ). По сути,

отливка с монокристаллической макроструктурой, это отливка, состоящая из одного кристалла – дендрита с внешней формой отливки.

Использование метода направленной кристаллизации для получения отливок из никелевых сплавов было вызвано необходимостью повышения уровня жаропрочности литых деталей, которого уже невозможно было достичь дополнительным легированием сплавов, а новые сплавы, разработанные на основе более тугоплавких металлов (Nb, Cr и т.п.), не привели к ожидаемому результату. Поэтому в настоящее время одним из основных направлений повышения жаропрочности литых деталей является использование способов, обеспечивающих получение в отливках регламентированной, направленно-ориентированной макроструктуры.

В данном направлении решения проблемы повышения долговечности работы литых деталей в условиях ползучести требуемого результата достигают за счёт устранения в отливках межзёренных границ, расположенных перпендикулярно относительно направления действия силовой нагрузки на литую деталь во время её работы, например, в ПТД или ПТУ.

Именно отсутствие межзёренных границ, расположенных перпендикулярно относительно направления действия силовой нагрузки на литую деталь, в направленно-закристаллизованных отливках позволило, по сравнению с отливками, имеющими равноосную макроструктуру, повысить термостойкость деталей (по числу циклов до разрушения) в 2 и более раз, а отливки с монокристаллической макроструктурой, вообще не имеющие никаких межзёренных границ, кроме того, характеризуются ещё и более высоким сопротивлением высокотемпературной газовой коррозии, которая получает своё развитие, как правило, с границ зёрен.

Усреднённый химический состав некоторых литейных жаропрочных сплавов, используемых для изготовления отливок с направленно-столбчатой и монокристаллической макроструктурой, приведен в табл. 1.61.

Таблица 1.61
Усреднённый химический состав литейных жаропрочных никелевых сплавов для отливок с направленно-столбчатой и монокристаллической макроструктурой

Марка сплава	Массовая доля элементов, % (остальное – Ni)												
	C	Cr	Co	W	Mo	Ti	Al	Nb	Hf	Re	Ta	B	Zr
Жаропрочные сплавы для отливок с направленно-столбчатой макроструктурой													
ЖС-6Ф	0,14	5,6	9,0	13 (W+Mo)	6,45 (Ti+Al)	1,4	1,3	–	V=1	0,035 (B+Zr)			
ЖС30	0,15	6,0	8,5	12,8 (W+Mo)	7,15 (Ti+Al)	1,2	0,6	–	–	0,015 (B+Zr)			
ЖС26У	0,15	5,0	9,0	13 (W+Mo)	(7-10) (Ti+Al)	1,4	0,1	–	–	0,01-0,30	–		
ЖС28	0,15	5,0	9,0	8-14	0,5-2	–	4,5-7	0,5-5	–	2	–	0,01-0,10	–
ЖС32	0,15	5,0	9,3	2-10	0,5-5	–	4,5-8	1,5-5	–	4	–	0,01-0,30	–
CM186LC	0,07	6,0	9,0	8	0,5	0,7	5,7	–	1,4	3	3	0,015	0,05
Rene 142	0,12	6,6	12	4,9	1,5	–	6,2	–	1,5	2,8	6,4	0,015	0,03
MAR M247	0,15	8,5	10,0	10,0	0,7	1,0	5,5	–	1,4	–	3,5	0,015	0,05
Жаропрочные сплавы для монокристаллических отливок													
ЖС30М	–	7	7	12,7 (W+Mo)	7,2 (Ti+Al)	1	0,001	–	–	–	–	0,004 (B+Zr)	
ЖС40	–	6	–	6-7,8	3,5-4,8	–	5-5,8	0,05-0,5	–	–	6-7,8	–	–
ЖС36	–	4	5,5	10,5-13	1-4	0,7-1,5	5-6,2	1	–	1-2,6	–	–	–
PWA1480	–	10	5	4	–	1,5	5	–	–	–	12	–	–
CMSX-10	–	2	3	5	0,4	0,2	5,7	0,10	0,15	6	8	–	–
Rene N6	0,05	4,2	12,5	6	1,4	–	5,75	–	0,03	5,4	7,2	0,004	–
DD-3	–	9,5	–	5,2	4,2	2,3	5,8	–	–	–	–	–	–
SC7-14-6	0,01	–	–	6,0	13,2	–	6,7	–	–	–	–	0,002	0,01

Температуры фазовых превращений и количество γ -фазы в некоторых жаропрочных никелевых сплавах приведены в табл. 1.62 [100].

Таблица 1.62
Температуры фазовых превращений и количество γ -фазы в жаропрочных никелевых сплавах

Марка сплава	$t_{п.р.}, ^\circ\text{C}$	$t_{звт}, ^\circ\text{C}$	$t_s, ^\circ\text{C}$	$t_L, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{LS}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{T0}, ^\circ\text{C}$	$V_\gamma, \%$
ЖС30	1264	1254	1283	1375	92	-10	59,7
ЖС26У	1260	1284	1310	1383	73	24	61,9
ЖС32	1273	1306	1345	1412	67	33	67,3
CM186LC	1253	1272	1337	1386	49	19	64,6
ЖС30М	1271	1297	1319	1403	84	26	58,8
ЖС40	1295	1324	1349	1407	48	29	59,2
ЖС36	1295	1305	1337	1409	72	10	64,6
PWA1480	1298	1323	1325	1374	49	25	57,3
CMSX-10	1359	1348	1394	1441	47	-11	56,0
Rene N6	1291	1315	1365	1439	74	24	65,0

Примечание. $t_{п.р.}$ – температура полного растворения γ -фазы в матрице; $t_{звт}$ – температура окончания кристаллизации неравновесной эвтектики ($\gamma-\gamma'$); t_s и t_L – температура солидус и ликвидус сплава соответственно; Δt_{LS} – температурный интервал кристаллизации сплава; Δt_{T0} – температурный интервал, предопределяющий возможность проведения высокотемпературной гомогенизации без риска оплавления междендритных областей и чувствительность к перегревам ($\Delta t_{T0} = t_{звт} - t_{п.р.}$); V_γ – доля γ -фазы в сплаве (по объёму).

Механические свойства некоторых термически обработанных жаропрочных никелевых сплавов при высокой температуре приведены в табл. 1.63.

Таблица 1.63
Механические свойства термически обработанных жаропрочных никелевых сплавов при высокой температуре

Марка сплава	Термическая обработка	Механические свойства			
		$\sigma_B^{900}, \text{МПа}$	$\sigma_{1000}^{1000}, \text{МПа}$	$\sigma_{100}^{900}, \text{МПа}$	$\delta, \%$
ЖС-6Ф (НК)	Закалка с 1230 $^\circ\text{C}$ 3 ч и старение при 950 $^\circ\text{C}$ 2 ч	850	180	450	12
ЖС26 (ВНК)	Закалка с 1260 $^\circ\text{C}$ 4 ч	880	200	410	8
ЖС32 (монокр)	Закалка с 1280 $^\circ\text{C}$ 4 ч	960	250	475	18

Примечание. НК – направленная кристаллизация сплава, ВНК – высокоскоростная направленная кристаллизация сплава, монокр – монокристалл.

Метод направленной кристаллизации отливки создает, практически, идеальные условия ее питания при затвердевании и обеспечивает управляемость процессом формирования эксплуатационных свойств литой детали. В частности, при направленной кристаллизации, в условиях определенной кристаллографической ориентации зёрен отливки, понижение модуля упругости сплава позволяет понизить уровень термических напряжений в отливке и повысить в 2...3 раза сопротивление термоусталости сплава, по сравнению со сплавом с равноосной макроструктурой.

Как было отмечено выше, разрушение отливок с равноосной макроструктурой в условиях растягивающих напряжений происходит по границам зёрен, расположенных перпендикулярно направлению действующей нагрузки. В то же время направленно-закристаллизованные отливки, в отсутствие поперечных межзёренных границ, расположенных перпендикулярно действующей нагрузке, разрушаются в межзёренных пространствах по границам раздела $\gamma_{звт}$ – матрица и карбид – матрица, что

значительно повышает жаропрочность сплавов и уменьшает темп разрушения литых деталей в процессе их эксплуатации.

Для получения направленно-столбчатой или монокристаллической макроструктуры в отливке от затвердевающего расплава в форме осуществляют направленный теплоотвод. В результате этого, по высоте отливки, формируется определенный температурный градиент, предопределяющий протяженность зоны (области) существования сплава в двухфазном (твёрдо-жидком) состоянии в затвердевающей отливке. При этом с уменьшением градиента температуры по высоте отливки протяжённость двухфазной зоны в отливке увеличивается. В свою очередь, протяжённая двухфазная область существования сплава в направленно-затвердевающей отливке не только увеличивает величину усадочной пористости и степень дендритной ликвации химических элементов в структуре сплава отливки, но и способствует образованию в отливке поверхностных струйных полос и равноосных зёрен. Указанные дефекты макроструктуры таких отливок являются определённым препятствием в повышении свойств металла отливок и требуют специальных мер для их предотвращения. В основном, именно эти обстоятельства и привели к необходимости разработки специальных никелевых сплавов, предназначенных для получения отливок методом направленной кристаллизации.

Для достижения поставленной цели легирование жаропрочных никелевых сплавов, предназначенных для получения отливок методом направленной кристаллизации, осуществляют таким образом, чтобы оно обеспечивало минимальное различие плотностей расплава в жидкой и двухфазной области кристаллизующегося сплава отливки при минимальном температурном интервале кристаллизации сплава. При этом легирование должно обеспечивать структурную стабильность сплавов.

Для выполнения указанного комплекса требований никелевые сплавы дополнительно легируют рением и танталом. Использование данных химических элементов в сплавах, в частности, позволяет в несколько раз повысить ресурс лопаток ГТД.

В сплавах, используемых для изготовления монокристаллических отливок, отсутствуют элементы, упрочняющие границы зёрен (С, В, Zr, Hf), поскольку в монокристалле межзёрненные границы отсутствуют. Соответственно, в этих сплавах, в связи с отсутствием углерода, отсутствует и карбидная фаза, что, в свою очередь, повышает стойкость отливок при циклических и термоциклических нагрузках. Кроме того, отсутствие вышеуказанных химических элементов способствует уменьшению величины температурного интервала кристаллизации сплавов. Отсутствие углерода и бора в сплавах повышает температуру полного растворения γ' -фазы и увеличивает её термическую стабильность. В связи с этим жаропрочность данных сплавов выше, чем у сплавов с направленно-столбчатой макроструктурой, содержащих углерод.

Сплавы типа ВКНА, выполненные на основе интерметаллида Ni_3Al , относятся, соответственно, к интерметаллидному классу и используются для изготовления высокотемпературных деталей горячего тракта ГТД (рабочие и сопловые лопатки, жаровые трубы и т.д.). При замене никелевых аналогов интерметаллидные сплавы обеспечивают повышение рабочей температуры деталей до $1300^{\circ}C$, снижение массы литой детали на 10%, увеличение срока её службы в 3...4 раза, а также экономию дорогостоящих W, Ta и Re.

Сплавы типа ВКНА характеризуются длительной работой в коррозионно-активной среде продуктов сгорания топлива авиационных двигателей при температурах до $1250^{\circ}C$ во всеклиматических условиях, без защитных покрытий. При этом отливки из данных сплавов могут быть получены как с равноосной, так и с направленно-столбчатой или монокристаллической макроструктурой [99].

Сплавы ВКНА с монокристаллической макроструктурой во многих случаях могут успешно заменять высоколегированные никелевые сплавы. При этом высокая жаропрочность сплавов ВКНА достигается не за счёт их легирования дефицитными элементами, а за счёт создания в отливке регламентированной структуры.

Сплавы типа ВКНА с равноосной макроструктурой характеризуются низкой пластичностью при рабочих температурах, однако, использование высокоскоростной направленной кристаллизации позволяет получать отливки с направленно-столбчатой макроструктурой, увеличить пластичность сплава ВКНА-4 в десять раз при температуре $900...1100^{\circ}C$, а также повысить показатели прочности, термостойкости и усталости [217].

Химический состав жаропрочных никелевых сплавов на основе интерметаллида Ni_3Al , разработанных в ВИАМ (Россия) и предназначенных для направленной кристаллизации отливок, приведен в табл. 1.64.

Таблица 1.64

Химический состав жаропрочных никелевых сплавов на основе интерметаллида Ni_3Al

Марка сплава	Содержание основных химических элементов, % (остальное – Ni)						
	C	Al	Co	Ti	W	Mo	Cr
ВКНА-4У	0,007–0,02	7,8–9,0	3,5–4,5	0,6–1,2	1,8–2,5	4,5–5,5	4,5–5,5
ВКНА-1В	0,001–0,02	7,8–9,5	-	1,3–2,0	2,7–4,5	3,0–4,3	5–7

Современный уровень развития техники позволяет не только изготавливать отливки методом направленной кристаллизации в условиях серийного производства литья, но и позволяет изготавливать отливки из эвтектик с ориентированной структурой, представляющих собой естественные композиционные жаропрочные сплавы.

К числу эвтектических никелевых сплавов относятся сплавы типа ВКЛС, которые являются естественными композитами на основе эвтектики γ -фазы и монокарбида MeC. В структуре сплавов данного класса, формирование направленно-ориентированных нитевидных волокон монокарбида MeC и выделение вторичной γ' -фазы между волокнами происходит в процессе направленной кристаллизации отливки.

При высокой температуре эксплуатации литой детали основным упрочнителем жаропрочных композиционных сплавов системы γ/γ' -MeC являются волокна MeC, которые обладают высокой температурной стабильностью.

Температурный уровень эвтектических никелевых сплавов существенно выше, чем у аналогичных сплавов с равноосной и направленной макроструктурами. Например, по сравнению со сплавами типа ЖС, эвтектические сплавы ВКЛС имеют значительно большую жаропрочность при температурах более $1100^{\circ}C$, что делает данные сплавы весьма перспективными для производства рабочих турбинных лопаток высокотемпературных турбин.

Существенным недостатком сплавов эвтектического класса является их крайне низкая скорость кристаллизации и необходимость обеспечения плоского фронта кристаллизации в затвердевающей отливке. Например, по данным [217], оптимальная структура и свойства сплава ВКЛС-20 в направленно-закристаллизованных отливках достигается при скорости направленной кристаллизации $8...10$ мм/ч или $0,13...0,17$ мм/мин (скорость продвижения фронта кристаллизации в условиях направленной кристаллизации сплавов типа ЖС составляет $10...20$ мм/мин и более). Кроме того, на поверхности отливок из сплавов типа ВКЛС в процессе кристаллиза-

ции формируются крупные карбиды типа FeC неблагоприятной формы (ограненной, дендритной), что понижает свойства отливок.

К числу сплавов, работающих в коррозионно-активных средах продуктов сгорания топлива, относятся высокохромистые коррозионностойкие никелевые сплавы, усреднённый химический состав которых приведен в табл. 1.65 [99].

Усреднённый химический состав высокохромистых коррозионностойких никелевых сплавов

Таблица 1.65

Марка сплава	Содержание основных химических элементов, % (остальное – Ni)											
	Cr	Ti	Mo	W	Ta	Al	Co	Hf	Nb	не более		C
										B	Zr	
Сплавы для получения отливок с направленно-столбчатой макроструктурой												
DS-16	16,0	3,5	3,0	—	3,5	3,5	5,0	1,0	—	0,015	0,015	0,06
DSGTD-111	14,0	5,0	1,5	3,7	3,0	3,0	9,4	0,15	—	0,010	0,05	0,10
IN792LS	12,5	3,5	1,85	4,1	4,1	3,4	9,0	1,0	—	0,015	0,02	0,08
ЦНК-7	14,8	3,9	0,4	0,85	—	3,9	8,75	—	—	0,010	—	0,08
ЖКС-1	14,0	4,0	2,0	4,0	0,5	4,0	9,0	—	1,0	0,015	—	0,10
Сплавы для получения отливок с монокристаллической макроструктурой												
SC-16	16,0	3,5	3,0	—	3,5	3,5	—	—	—	—	—	—
PVA1483	12,0	4,1	1,9	3,8	5,0	3,6	9,0	0,007	—	0,003	0,0005	0,07
CMSX-11C	14,9	4,2	0,4	4,5	5,0	3,4	3,0	0,004	0,01	0,002	0,001	0,002
CMSX-11B	12,5	4,2	0,5	5,6	5,0	3,6	7,0	0,004	0,01	0,002	0,001	0,002
ЦНК-8	12,3	4,5	—	6,7	—	4,1	8,8	—	—	—	—	—

В основу разработки составов сплавов, приведенных в табл. 1.65, в основном, положены те же принципы, что и при разработке традиционных литейных никель-хромистых сплавов с соблюдением соотношения содержания в сплаве $Al / Ti \geq (0,7...1,0)$ и повышением содержания хрома до 12...22%, для обеспечения сопротивления солевой и газовой коррозии. Влияние химических элементов на свойства жаропрочных никелевых сплавов приведены в табл. 1.66.

Таблица 1.66

Влияние химических элементов на свойства жаропрочных никелевых сплавов

Элемент	Характеристика
1	2
Al, Ti	Основные γ -образующие элементы. Элементы, в основном, присутствуют в γ -фазе. Al — обеспечивает защиту отливок от высокотемпературной коррозии, повышает механические свойства при высоких температурах, резко понижает окислительность сплавов. Ti — сильный карбидообразователь, способствует росту твердости сплавов в закаленном состоянии и после старения. При содержании более 3,5% существенно понижает пластичность и вязкость вследствие появления в структуре, после старения, грубых выделений избыточной фазы. В сплаве ЖС26 значительно снижает его жаростойкость. Понижают жидкотекучесть сплавов и увеличивают брак отливок по окисным пленкам.
Hf	Сильный карбидообразователь, в основном, присутствующий в γ -фазе. Повышает прочность и пластичность, увеличивает долю эвтектической γ -фазы и благоприятно изменяет морфологию карбидов типа Me_3C . Повышает сопротивление ползучести. В боридной фазе замещает хром, повышая тугоплавкость боридов. С серой образует стойкие сульфиды. Повышает термостабильность γ -фазы, увеличивая температуру её полного растворения. Сильно лихвирует в межосевые участки, вызывая пересечение междендритных объемов γ -образующими элементами. В направленно-закристаллизованных сплавах значительно повышает пластичность в поперечном направлении. В направленно-закристаллизованном сплаве ЖС-6Ф усиливает карбидную ливкацию, способствует образованию в поверхностном слое отливок карбидов типа Me_3C , обладающих низкой жаростойкостью и не покрывающих при диффузионном апитировании поверхности литой детали.

Продолжение табл. 1.66

1	2
Nb	Сильный карбидообразователь, в основном, присутствующий в γ -фазе. Упрочняет твердый раствор, повышает стабильность и жаропрочность сплавов, снижает склонность сплавов к «перестариванию» и к зональной ливкации, повышает температуру рекристаллизации и замедляет диффузионные процессы в сплаве.
V	Значительно повышает жаропрочность при одновременном понижении жаростойкости. Карбидообразующий элемент.
Zr	В сплавах используется для повышения их пластичности. Максимальный эффект повышения пластичности достигается при содержании в сплаве ~0,01% Zr. При больших и меньших количествах Zr пластические свойства сплавов понижаются. Совместное легирование сплавов (Zr+B) способствует повышению времени до разрушения сплава при испытаниях на ползучесть в несколько раз.
W	Значительно упрочняет сплавы, незначительно понижая пластические свойства. Повышает температуру плавления сплавов. Примерно в одинаковом количестве находится в γ -твердом растворе и γ -фазе. Карбидообразователь.
Mo	Повышает стойкость к сульфидной коррозии. Повышает стабильность интерметаллида Ni_3Al , замедляет диффузию алюминия в γ -твердом растворе, повышая жаропрочность сплавов. В повышении жаропрочности сплавов молибден менее эффективен, чем вольфрам и рений. В основном, находится в γ -твердом растворе. Карбидообразователь.
Cr	При повышении содержания в сплавах от 2% до 20% понижает жаропрочность, но повышает жаростойкость. Понижение жаропрочности обусловлено уменьшением растворимости хрома в твердом растворе и образованием самостоятельных фаз на основе α -Cr, σ - и μ -фаз. Карбидов типа $Me_{23}C_6$, Me_6C и т.п. неблагоприятной морфологии, а также обеднения основных фаз легирующими элементами. Понижает долговечность и пластичность. Расширяет интервал кристаллизации сплава и ухудшает его технологические свойства. В основном входит в состав γ -твердого раствора. Карбидообразователь.
Co	Незначительно повышает жаропрочность и существенно повышает пластичность. В жаропрочных сплавах содержание кобальта изменяется от 3% до 12,5%. Оптимальное содержание ~10%. В основном входит в состав γ -твердого раствора.
C	В высокожаропрочных сплавах его содержание не превышает 0,2% для сплавов с равносторонней макроструктурой и не превышает 0,05% для сплавов, используемых для получения монокристаллических отливок. С понижением содержания углерода повышается пластичность сплавов при некотором снижении прочности и долговечности. В сплавах образует трудно-растворимые карбиды титана и хрома ($Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3), в присутствии в сплаве W и Mo образует карбиды типа Me_6C . В сплавах типа ЖС-ЗДК уменьшает количество упрочняющей γ -фазы. Понижает температуру плавления и термическую стабильность сплава. Способствует предотвращению образования в отливках горячих трещин. Сильный раскислитель. Понижает жидкотекучесть сплава.
Ta	Повышает термическую устойчивость γ -фазы. Находясь в составе карбидов, улучшает их морфологию. Обеспечивает длительную работоспособность при повышенной температуре. Наиболее эффективно совместное легирование сплавов (Ta+Re). Элемент в основном присутствует в γ -фазе. Карбидообразователь.
Re	Повышает жаропрочность и температуру плавления сплавов. Значительно повышает термостабильность γ -матрицы сплавов. Существенно повышает сопротивление высокотемпературной газовой коррозии. Элемент в основном входит в состав γ -твердого раствора.
B	Оптимальное содержание в сплавах 0,01–0,02% при содержании углерода в пределах от 0,1 до 0,2%. Улучшает свойства сплавов при увеличении содержания бора до 0,1% и одновременном понижении содержания в сплаве углерода до 0,02%. Понижает температуру солидуса сплавов. В сплавах с монокристаллической структурой бор либо отсутствует, либо его содержание не превышает 0,004%.
Y	Содержание в сплаве около 0,01–0,08%. Обязательная добавка для сплавов, кристаллизующихся с равносторонней макроструктурой. Повышает стойкость к высокотемпературному окислению, повышает жаропрочность.
Si	Вредная примесь. Повышает сопротивление сплавов к окислению, но при этом значительно снижает пластичность, длительную прочность и свариваемость. Понижает температуры ликвидус и солидус, температуру растворения карбидов. С увеличением содержания в сплаве Al и Ti, содержание Si следует уменьшать.
Mn, Fe	Вредные примеси, ухудшающие свойства сплавов (жидкотекучесть, жаропрочные свойства, длительную прочность). Содержание марганца в сплавах ограничено 0,3%, содержание железа — 1%.

2
Окончание табл. 1.66

1	
S, P	Вредные примеси, резко понижающие свойства сплавов, в частности, жаропрочность. P – повышает жидкотекучесть сплавов.
Sb, Pb, Sn, Bi	Вредные примеси, резко понижающие длительную прочность сплавов.

Титановые литейные сплавы. Титановые сплавы, по сравнению с другими сплавами, имеют следующие преимущества: сочетание высокой прочности с хорошей пластичностью, низкую плотность, обеспечивающую высокую удельную прочность, относительно высокую жаропрочность, высокую коррозионную стойкость в агрессивных средах.

Классификацию титановых литейных сплавов, в основном, осуществляют по типу и количеству структурных составляющих сплавов.

По количеству основных структурных составляющих, титановые сплавы делят на три группы: однофазные α -сплавы и однофазные β -сплавы, а также двухфазные $\alpha+\beta$ -сплавы. К числу α -стабилизирующих элементов сплавов относятся N, O, C и Al (Al – основной легирующий элемент титановых сплавов), β -стабилизаторами являются изоморфные элементы – V, Nb, Mo, Ta, образующие неограниченные твердые растворы с β -фазой, и званктоидообразующие – Cr, Mn, Co, Ni, Fe, Si, Cu. Нейтральными упрочнителями титановых сплавов являются – Zr, Hf, Ge, Sn.

Наиболее сильными упрочнителями титановых сплавов, помимо Al, являются Cr, Mn, Co, Fe. Ввод данных элементов в титановые сплавы в количестве 3% повышает прочность титана в литом состоянии в 1,5...2 раза при одновременном снижении пластичности в 2...4 раза.

Титановые сплавы имеют низкие антифрикционные свойства, затрудненную обрабатываемость резанием, обладают высокой герметичностью и не дают течи вплоть до давления, приводящего к разрушению испытуемых отливок. В жидком состоянии титан химически активный элемент. При комнатной температуре, за счёт образования на поверхности металла плотной защитной плёнки из окиси титана, титан и его сплавы обладают исключительно высокой коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах, а также в атмосфере и морской воде. По коррозионной стойкости в морской воде титан уступает только платине. Основной особенностью титана является его низкая теплопроводность, которая при комнатной температуре ниже, чем у железа в 4 раза и ниже в ~13 раз, чем у алюминия.

Слав ВТ1Л, благодаря высокой технологичности и коррозионной стойкости в различных кислотах, морской воде и других средах, нашел широкое применение в изделиях химического машиностроения, а также в медицине для изготовления соединительных клапанов и эндопротезов.

Отливки из сплавов ВТ5Л, ВТ6Л, ВТ9Л, ВТ20Л широко используют для изготовления высоконагруженных деталей ответственного назначения: литых корпусов двигателей, турбин, крыльчаток и т.д. Повышения работоспособности титановых сплавов достигают путём их модифицирования. Например, сплав ВТ5Л модифицируют путём введения в него 0,01% бора или карбида бора.

По сравнению со сплавами, изготовленными на основе никеля и железа, несмотря на более высокую температуру плавления, сплавы на основе титана имеют более низкую жаропрочность. При этом наиболее целесообразно применение отливок из титановых сплавов в интервале температур 250...500°C, взамен отливок из сплавов на основе алюминия и магния. Например, сплавы ВТ5Л, ВТ6Л и ВТ21Л ре-

комендуется использовать для изготовления отливок, длительно работающих при температурах до 400°C, сплав ВТ3-1Л – до 450°C, сплавы ВТ9Л и ВТ20Л – до 500°C.

Химический состав и некоторые параметры титановых сплавов приведены в табл. 1.67.

Таблица 1.67

Марка сплава	Массовая доля элементов, % (остальное – Ti)					Свойства		
	Al	V	Mo	Прочие	Примесей (не более)	$t_s, ^\circ\text{C}$	$t_L, ^\circ\text{C}$	$\rho_{20}, \text{кг/м}^3$
ВТ1Л	–	–	–	–	0,72	1655	1670	4500
ВТ3-1Л	5,3–7,0	–	2,0–3,0	0,15–0,40 Si; 0,8–2,3 Cr; 0,2–0,7 Fe	0,845	1560	1620	4430
ВТ5Л	4,1–6,2	<0,5	<0,5	–	1,765	1600	1640	4410
ВТ6Л	5,0–6,5	3,5–4,5	–	–	1,065	1590	1640	4430
ВТ9Л	5,6–7,0	–	2,8–3,8	0,20–0,35 Si; 0,8–2,0 Zr	0,675	1560	1620	4490
ВТ14Л	4,3–6,3	0,9–1,9	2,5–3,8	–	1,535	1590	1650	4500
ВТ20Л	5,5–7,5	0,8–1,8	0,5–2,0	1,5–2,5 Zr	0,815			

Предельное содержание примесей (% по массе) в литейных титановых сплавах приведено в табл. 1.68.

Таблица 1.68

Марка сплава	C	O ₂	N ₂	H ₂	Fe	Si	Zr	W
ВТ5Л	0,02	0,20	0,05	0,15	0,35	0,20	0,80	0,20
ВТ6Л	0,10	0,15	0,05	0,15	0,30	0,15	0,30	0,20
ВТ3-1Л	0,15	0,18	0,05	0,15	–	–	0,50	0,20
ВТ9Л	0,15	0,15	0,05	0,15	0,30	–	–	0,20
ВТ14Л	0,12	0,15	0,05	0,15	0,60	0,15	0,30	0,20
ВТ20Л	0,15	0,15	0,05	0,15	0,30	0,15	–	–

Механические свойства литейных титановых сплавов приведены в табл. 1.69.

Таблица 1.69

Марка сплава	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$\varphi, \%$	ан, кДж/м ²
ВТ1Л	343	294	10	20	392
ВТ5Л	683	618	6	14	294
ВТ6Л	834	736	5	10	245
ВТ3-1Л	932	814	4	8	245
ВТ9Л	932	814	4	8	196
ВТ14Л	883	785	5	12	245
ВТ20Л	932	834	8	20	245
ВТ21Л	981	843	4	8	196

Относительная жидкотекучесть титановых сплавов, заливаемых в оболочковые формы, изготовленные из различных материалов, приведена в табл. 1.70.

Таблица 1.70
Относительная жидкотекучесть титановых сплавов

Материал оболочковой формы	Относительная жидкотекучесть сплава				
	BT1Л	BT5Л, BT6Л	BT9Л	BT20Л	BT21Л
Белый электрокорунд	1	1,10	0,67	1,21	0,57
Графит	0,85	0,90	0,38	0,97	0,35

Примечание. Относительная жидкотекучесть сплавов определена по отношению к жидкотекучести сплава BT1Л, залитого в КО, изготовленную на основе белого электрокорунда. Обработка данных [290].

Технически чистый титан (BT1Л) получил наиболее широкое распространение для изготовления фасонных отливок коррозионностойкой арматуры химического производства. Как и сплав BT5Л, технически чистый титан BT1Л характеризуется сравнительно небольшой прочностью, высокой пластичностью и ударной вязкостью, обладает высокой жидкотекучестью, отлично сваривается всеми видами сварки. Сплав BT20Л имеет более высокую прочность, чем сплав BT5Л, и характеризуется такими же высокими литейными свойствами и хорошей свариваемостью. Наибольшее распространение сплав BT20Л получил в производстве отливок транспортного машиностроения, в частности, авиастроения.

Двухфазный титановый сплав BT6Л относится к числу конструктивных высокопрочных титановых сплавов и используется для изготовления различных нагруженных деталей. Наиболее высокопрочным титановым сплавом является сплав BT21Л, имеющий довольно широкий интервал кристаллизации и поэтому склонный к образованию усадочной пористости и рыхлоты в отливках.

К числу двухфазных сплавов, содержащих в своей структуре значительное количество β -фазы, также относятся сплавы BT3-1Л, BT9Л, BT14Л. Сплавы BT3-1Л и BT9Л обладают повышенной жаропрочностью, в связи с чем используются для получения отливок деталей авиационных двигателей, работающих в условиях повышенных температур. Сплав BT14Л используют для получения различных отливок, используемых в авиастроении.

Помимо вышеуказанных, наиболее распространённых марок титановых сплавов, существуют и другие марки, в частности титановый сплав BT35Л. Сплав BT35Л относится к числу высокопрочных псевдо- β титановых сплавов. Сплав BT35Л характеризуется высокой прокаливаемостью, что позволяет закалывать его в вакуумной литейной установке непосредственно в форме в период охлаждения литой детали. После закалки величина σ_B сплава достигает 780...820 МПа. Последующее старение отливок при 500...550°C в течение 6...8 ч повышает σ_B до 1100...1150 МПа.

Несмотря на высокие литейные свойства, получение отливок из титана и его сплавов сопряжено с большими трудностями, что связано с высокой химической активностью титана в жидком состоянии.

Кобальтовые сплавы. Плотность кобальтовых сплавов около 8320 кг/м³. Кобальтовые сплавы, в основном, используются для изготовления литых деталей, работающих при высоких температурах. Кобальтовые сплавы системы Co-Cr-C(X), где X - W, Mo, Nb, Ni, характеризуются хорошими литейными свойствами.

Поскольку упрочнение кобальтовых сплавов, в основном, создаётся карбидными фазами, кобальтовые сплавы содержат 0,2...1,0% С. Добавка бора улучшает ли-

тейные характеристики сплавов, однако, в ряде случаев, ухудшает их свариваемость.

Отливки на кобальтовой основе, в основном, применяют без последующей термической обработки.

Наиболее широкое распространение получили сплавы систем Co-Cr, Co-Cr-Ni, Co-Cr-Ni-W, а также многокомпонентные кобальтовые сплавы с легирующими элементами, придающими сплавам высокую жаропрочность.

Лучшим элементом, повышающим стойкость к окислению кобальтовых сплавов, является хром. При содержании хрома в сплавах около 25% окислительная стойкость сплавов повышается до 1000°C, а при содержании хрома не менее 30% окислительная стойкость достигает 1200°C. Ввод в сплавы тория, кремния и церия также способствует повышению сопротивления окислению кобальтовых сплавов.

Повышению прочности кобальтовых сплавов способствует введение в них никеля и вольфрама. Например, кобальтовый сплав HE-1049, содержащий 0,4%С, 26%Cr, 10%Ni, 15%W, 3%Fe, 1%Mo и 0,4%В, обладает лучшей, чем большинство известных жаропрочных сплавов на основе железа и никеля, прочностью, хорошо работает в условиях напряжений и температур. В табл. 1.71 приведен химический состав некоторых сплавов на основе кобальта.

Таблица 1.71

Химический состав кобальтовых сплавов

Марка сплава	Массовая доля элементов, % (остальное - Co)							
	C	Cr	Mo	W	Ni	Fe	Si	Другие
ЛК4	0,20-0,35	25-30	4,6	-	1,5-3,5	≤2	-	-
Виталпиум	0,35-0,50	23-29	-	4-7	<1,5	≤2	-	-
ВКЗ	1,00-1,20	25-28	-	4-5	-	0,3-0,8	2,0-2,5	-
Stellite 1	2,30-2,60	31-34	-	12-14	≤2	-	≤1,2	-
Stellite 6	0,90-1,30	26-30	≤1,0	4-6	≤2	-	1-2	Mn ≤ 1,0, P ≤ 0,02, S ≤ 0,02, B ≤ 0,01
Stellite F	1,50-1,70	23-27	≤1,0	10,5-13,5	20,5-23,5	≤1,5	≤1,3	-
Stellite 12	1,60-2,0	28-31	-	8-10	≤2	-	≤1,4	-
Stellite 12H	1,60-1,75	31,5-33,5	-	10-12	≤2	-	≤1,0	-
Stellite 20	2,30-2,60	31-35	-	16-19	≤2	-	≤1,0	-
T 400	≤0,08	7,5-9,0	27-29	-	≤0,70	≤0,7	2,2-2,6	Mn ≤ 0,3, P ≤ 0,02, S ≤ 0,02, B ≤ 0,01
T 400-2	0,05-0,10	7,5-9,5	27-29	-	1-2	1-2	2,2-2,6	-

Примечание. Стеллит - от англ. Stellite - фирменное название, от лат. stella - звезда.

Стеллит - общее название группы литых, наплавочных, твёрдых сплавов на кобальтовой основе. Стеллиты обладают высокой твёрдостью в достаточно широком интервале температур, высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью. Стеллиты либо наплавляют на рабочую поверхность деталей (седла клапанов, лопатки газовых турбин и др.), либо применяют в виде готовых отливок, которые перед использованием в качестве инструмента, подвергают шлифовке.

Кобальтовые сплавы типа тантунг (27...36% Cr, 14...19% W, до 7% Nb или Ta) обладают хорошими литейными свойствами, умеренной склонностью к образованию трещин в отливках. Эти сплавы немагнитны, обладают высокой жаростойкостью, твёрдостью, высоким сопротивлением ударным нагрузкам, хорошей коррозионной стойкостью в различных средах, небольшим коэффициентом трения. Кроме того, сплавы типа тантунг имеют высокую стойкость в кислотах (азотной, фосфорной, ук-

сусной, молочной, лимонной, щавелевой), некоторых щелочах и других химически агрессивных средах.

Для изготовления постоянных магнитов используют сплавы, содержащие 52% Со, 35% или 38,5% Fe, 9,5 или 13% V. Магниты, изготовленные из этих сплавов, при комнатной температуре отличаются высокой пластичностью, высокой коэрцитивной силой (23880...36620 А/м) и максимальной плотностью магнитной энергии 40...140 Дж/см³. Сплав кобальта с платиной после термообработки, обеспечивающей его дисперсионное твердение, имеет коэрцитивную силу более 210900 А/м.

Хромовые сплавы. Отливки из сплавов на основе хрома (ВХ-2И, ВХ-4, ВХ-9Л и др.) используют для работы при температуре 980...1200°C. Сплавы на основе хрома имеют высокую жаропрочность, повышенную стойкость в окислительной атмосфере и эрозионной среде при высокой температуре. По жаропрочности сплавы на основе хрома превосходят все известные сплавы на основе железа, никеля, кобальта.

Свойства хромовых сплавов зависят от содержания в них примесей (в основном, азота). Некоторые механические свойства литейного сплава ВХ-4, содержащего 30% Ni, 1,5% W, 0,3% V, 0,2% Ti, приведены в табл. 1.72.

Хромовые сплавы могут длительно работать без защитных покрытий при температуре до 1350 °С и, кратковременно, до 1500 °С. Детали из хромовых сплавов успешно работают в потоке сгорающего топлива, при циклических изменениях температуры (в интервале от 600 до 1500 °С), из хромовых сплавов изготавливают детали приборов, манипуляторов и т. д.

Хромовые сплавы обладают хорошими литейными свойствами, однако склонны к образованию трещин, окисных плёнок и характеризуются плохой свариваемостью.

Ниобиевые сплавы. Порог хладноломкости низколегированных ниобиевых сплавов находится ниже температуры жидкого азота, что даёт возможность применять литые детали из этих сплавов для теплонагруженных деталей ракет, космических летательных аппаратов и самолётов специального назначения.

Ниобиевые сплавы стойки в ряде кислот и других химических реагентах, но окисляются при нагреве на воздухе и в других окислительных средах, при температуре более 400 °С. По этой причине литые детали из ниобиевых сплавов, работающих при температуре более 400 °С, покрывают защитными материалами.

Основными легирующими элементами ниобиевых сплавов являются Мо, W, V, которые образуют с ниобием непрерывный ряд твёрдых растворов с прочностью большей, чем у нелегированного ниобия. Кроме указанных химических элементов, ниобиевые сплавы легируют Zr или (Hf + C), или N.

Образующиеся в данном случае малорастворимые в твёрдом растворе высокостабильные карбиды и оксиды, а в некоторых случаях и оксикарбонитриды, способствуют дополнительному упрочнению сплава в результате механического торможения его ползучести.

Фасонные отливки из ниобия и его сплавов, после нанесения на них защитного покрытия, используют для работы при высоких температурах (до 1400 °С), в особо тяжёлых условиях, например, для деталей турбин.

Наибольшей жаропрочностью, из числа известных, обладают сплавы ниобия с 15% W, 5% Мо, 1% Zr или ниобия с 15% W, 5% Мо, 5% Ti, 1% Zr.

Химический состав и механические свойства некоторых ниобиевых сплавов приведен в табл. 1.73.

Таблица 1.72
Механические свойства хромового сплава ВХ-4

Температура испытания, °С	σ_B , МПа	δ , %
20	1050	10
800	600	16
1000	240	18
1200	60	25

Таблица 1.73
Химический состав и механические свойства ниобиевых сплавов

Марка сплава	Массовая доля элементов, % (остальное - Nb)				Механические свойства			
	Mo	Zr	C	Прочие	при 20°C		σ_B^{1200} , МПа	σ_B^{1500} , МПа
					σ_B , МПа	δ , %		
ВН2	3,8-5,2	-	≤0,05	-	-	-	190	-
ВН2А	3,5-4,7	0,5-0,9	≤0,08	-	-	-	300	170
ВН3	4,0-5,2	0,8-2,0	0,08-0,16	-	780	18	850	-
ВН4	8,5-10,5	1,0-2,0	0,25-0,50	0,01-0,05 Ti	810	16	250	170
ВН6	4,5-6,0	1,0	-	4,5-6,0 W	890	-	-	-
5ВМц	1,7-2,3	0,7-1,0	0,02	4,5-5,5 W	450	30	-	-

Ниобиевые сплавы обладают удовлетворительными литейными свойствами и не склонны к образованию трещин в отливках. Величина свободной линейной усадки ниобиевых сплавов находится в пределах от 1,5 до 2,0%. Сплавы на основе ниобия обладают хорошей технологичностью, коррозионной стойкостью, свариваемостью и достаточно высокой жаропрочностью.

Молибденовые сплавы. Молибденовые сплавы характеризуются относительно высокой химической активностью в жидком состоянии, существенным влиянием незначительных изменений химического состава расплава на его жидкотекучесть, склонны к образованию трещин в отливках. Свободная линейная усадка молибденовых сплавов составляет 1,5...1,9%. Усреднённый химический состав и механические свойства молибденовых сплавов приведены в табл. 1.74.

Таблица 1.74
Усреднённый химический состав и механические свойства молибденовых сплавов

Марка сплава	Массовая доля элементов, % (остальное - Mo)					Механические свойства					
	Zr	Ti	B	Nb	C	σ_B^{20} , МПа	σ_B^{1200} , МПа	σ_B^{1200} , МПа	σ_B^{1300} , МПа	σ_B^{1300} , МПа	σ_B^{1600} , МПа
ЦМ2А	0,11	0,2	-	-	≤0,004	800	300	90	-	-	60
ЦМ3	0,30	-	-	-	≤0,020	-	500	180	-	-	-
ЦМ6	0,15	-	0,002	-	0,004	-	350	-	-	-	-
ВМ2	0,32	≤0,2	-	≤0,2	-	750	-	-	-	-	-
ВМ3	0,45	1,1	-	1,25	0,350	830	-	-	500	260	-

Выплавку и заливку молибденовых сплавов в формы проводят в гарнизанных вакуумных плавильно-заливочных электронно-лучевых или дуговых установках. Для получения отливок используют КО, изготовленные на основе электрокорунда или циркония. Во избежание окисления поверхности отливки, её охлаждение в форме (до 100...300 °С) проводят в условиях вакуума.

Вольфрамовые сплавы. Из числа вольфрамовых сплавов наиболее известен сплав марки ВВ2 (система W-Nb), имеющий $\sigma_B^{1200} = 130$ МПа и $\sigma_B^{1300} = 80$ МПа. Сплав характеризуется удовлетворительными литейными свойствами, не склонен к образованию трещин в отливках. Залитую расплавом форму, выдерживают в вакууме, в вакуумной плавильно-заливочной установке, до достижения поверхности отливки температуры менее 300 °С.

Сплав характеризуется высокой жаропрочностью и низкой жаростойкостью, поэтому поверхность литых деталей, работающих при температуре большей, чем 400...600 °С, защищают от окисления.

Любая литая деталь является оригинальной конструкцией, к которой предъявляют определённые требования. В число таких требований входят: геометрическая точность, точность формы и точность массы, шероховатость поверхности, отсутствие внешних и внутренних литейных дефектов и т.п.

До начала разработки технологического процесса изготовления отливки, исходя из предполагаемой продажной цены отливки, прежде всего следует определить наиболее рациональный способ её изготовления, поскольку он предопределяет не только возможность получения литой детали с заданным уровнем качества и служебных свойств, но и рентабельность производства (**рентабельность производства – отношение экономической прибыли от реализации продукции к затратам, понесённым на её производство и распределение**).

Процесс конструирования отливки начинают с того, что на основании чертежа детали и требований к ней проводят разработку чертежа отливки с отработкой технологичности её конструкции и расчёт величин литейных усадок её отдельных частей. Впоследствии всё это используют для выбора конструкции и проектирования пресс-форм под модель и, если есть, стержень, для выбора положения отливки в пространстве при заливке, назначения мест установки холодильников, питателей и прирублей, назначения плоскости разъёма пресс-формы, назначения базовых поверхностей, припусков и т.п.

При конструировании отливки назначают литейные и геометрические припуски. К числу литейных припусков относят конусное утолщение стенок и рёбер, выполнение платиков и технологических рёбер, заполнение (невыполнение) отверстий, пазов, щелей и т.п.

То есть к литейным припускам относят те необходимые конструктивные изменения формы литой детали, которые направлены на получение отливки без недопустимых в ней литейных дефектов (рыхлот, усадочной пористости, трещин, спаев, зазоров и др.).

Геометрические припуски на отливку назначают для соблюдения размерной точности и шероховатости поверхности литой детали, которые указаны в её чертеже. Необходимость назначения геометрических припусков вызвана отклонением ("разбросом") величин того или иного размера от его номинального значения, от отливки к отливке.

Таким образом, первый этап конструирования отливки заканчивается разработкой её чертежа. Чертеж отливки, разработанный по чертежу детали, является основным документом для проектирования модельной и стержневой пресс-формы, приспособлений для контроля геометрических размеров стержней и отливок, приспособлений для крепления отливок при шлифовке, технологических баз под последующую механическую обработку и пр.

Обычно на чертеже отливки указывают: метод получения отливки, материал отливки и её группу, припуски на механическую обработку, технологические базы для механической обработки, технологические рёбра и питатели, зачастую выполняемые в единой с моделью пресс-форме, технические требования, предъявляемые к отливке в случае её последующей механической обработки, чистоту поверхности, контролируемые геометрические размеры, виды контроля металлургического качества отливки, а также допустимые отклонения при контрольных операциях.

Для отливок, подвергающихся механической обработке, утверждают натуральный эталон. При сдаче годных отливок на механическую обработку проводят контроль на соответствие сдаваемых отливок натурному эталону.

2.1. Принципы конструирования отливок

Рассматривая чертёж той или иной детали как отливки, прежде всего, её конструкцию оценивают с точки зрения её технологичности.

Технологичность отливки – это качественная характеристика конструкции отливки, определяющая степень соответствия её конструкции требованиям, направленным на обеспечение получения литой детали с заданным уровнем качества, в кратчайший срок, при наименьших затратах на производство.

При создании технологичной конструкции отливки ориентируются на следующие требования:

- 1) отливка должна быть компактной и, по возможности, представлять собой минимальное количество несложных сочленений простых по форме геометрических тел;
- 2) конструкция отливки должна обеспечить простоту изготовления, обслуживания и эксплуатации пресс-формы;
- 3) конструкция отливки должна обеспечить условия, при которых пресс-форму можно выполнить с минимальным количеством стержней и отъёмных частей, а все рабочие полости пресс-формы располагались в одной из её частей;
- 4) стенки отливки должны быть, преимущественно, одинаковой толщины, либо с увеличением толщины в направлении к питаемому термическому узлу отливки, либо питающему элементу ЛПС, обеспечивая соблюдение принципа последовательности затвердевания условно выделенных смежных элементов отливки;
- 5) в конструкции отливки не должно быть острых углов и резких переходов от толстых к тонким стенкам, протяжённых отверстий, "глухих" карманов, щелей и поднутреней;
- 6) конструкция отливки должна быть таковой, чтобы модель отливки была получена цельной в результате однократовой запрессовки модельного состава в одну пресс-форму;
- 7) конструкция отливки должна обеспечить удобство контроля качества как используемой для её изготовления пресс-формы и модели, так и самой отливки;
- 8) конструкция отливки должна обеспечить удобство хранения её модели и модельного блока, монтажа (сборки) модельного блока, нанесения и сушки огнеупорного покрытия, удаления модельного состава, подготовки КО под заливку, заливки КО, выбивки, обрубки и очистки отливки, удаления стержней;
- 9) конструкция отливки должна быть таковой, чтобы в процессе её изготовления не использовались стержни (водорастворимые, керамические и т.п.);
- 10) конструкция отливки должна обеспечивать простоту выбивки и обрубки отливки;
- 11) конструкция отливки должна обеспечивать удобство ремонта как её самой, так и её модели;
- 12) конструкция отливки должна обеспечивать простоту и удобство её механической обработки;
- 13) конструкция отливки должна быть максимально приближена к конструкции детали.

Положение отливки в пространстве при заливке. Правильный выбор положения отливки в пространстве при заливке тем важнее, чем выше требования к качеству литой детали, чем ниже технологичность конструкции отливки и используемого сплава.

В связи с этим при выборе положения отливки в пространстве при заливке формы под действием гравитации в условиях, когда начальная температура формы

меньше температуры солидус заливаемого сплава, придерживаются следующих положений и требований:

- 1) наиболее массивные тепловые узлы отливки, преимущественно, располагают в верхней части модельного блока;
- 2) тонкие протяженные кромки стенок отливки, преимущественно, располагают вертикально или горизонтально, но в нижней части стенок отливки;
- 3) обрабатываемые поверхности отливки, преимущественно, располагают внизу, вертикально или наклонно, а сами поверхности при этом должны быть обращены к низу;
- 4) обрабатываемые цилиндрические поверхности при заливке, преимущественно, располагают в вертикальном положении или с небольшим наклоном;
- 5) отливки балочного типа, преимущественно, располагают горизонтально;
- 6) отливки корпусного типа располагают таким образом, чтобы их тонкие стенки, преимущественно, располагались вертикально или наклонно;
- 7) базовые поверхности отливки, располагают в большинстве случаев в нижней части, для магниевых сплавов – в верхней части.

При этом положении отливки в пространстве должно обеспечить:

- 1) простоту конструкции ЛПС;
- 2) удобство и простоту монтажа (сборки) модельного блока, обрубки и механической обработки отливки;
- 3) компактность, конструкционную прочность и жёсткость модельного блока;
- 4) удобство нанесения огнеупорного покрытия на модельный блок и обеспечение хорошей вентиляции его поверхностей в процессе сушки огнеупорного покрытия на модельном блоке;
- 5) полноту удаления модельного состава из КО при его выплавлении;
- 6) контроль качества и ремонтпригодность КО;
- 7) устойчивость блока при его хранении, сушке, формовке и заливке металлом.

Выбор положения отливки в пространстве при заливке – достаточно ответственный момент, от которого зависит не только качество отливки, но и тип используемой ЛПС и, соответственно, технико-экономические показатели производства отливки.

В качестве примера на рис. 2.1,а представлен общий вид и разрез отливки "Тройник", а на рис.2.1,б...г – схемы некоторых конструкций ЛПС, используемых для получения данной отливки.

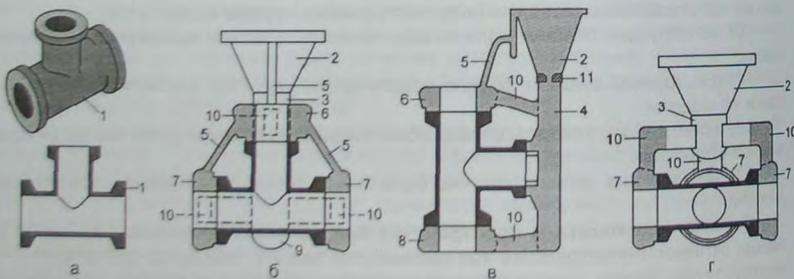


Рис. 2.1. Отливка "Тройник" (а) и схемы ЛПС (б...г):

- 1 – отливка; 2 – ЛЧ; 3 – стояк; 4 – питающий стояк; 5 – выпор; 6 – прибыль верхняя;
- 7 – прибыль боковая; 8 – прибыль нижняя; 9 – зумпф; 10 – литниковый ход; 11 – дроссель

Выбор плоскости разёма пресс-формы. Плоскость разёма пресс-формы предопределяет её конструкцию и трудоёмкость изготовления, в значительной степени влияет на размерную точность модели и, следовательно, отливки и т.п.

При выборе плоскости разёма пресс-формы следует исходить из того, что пресс-форма должна состоять из минимального количества частей, не содержать или иметь минимальное количество стержней (металлических, керамических, графитовых, водорастворимых), вставок и т.п. При этом плоскость разёма должна быть плоской, что способствует повышению размерной точности модели и упрощает процесс изготовления и технического обслуживания пресс-формы.

На рис. 2.2 в качестве примера представлены схемы отливок с нанесенной линией плоскости разёма пресс-формы. В случае конструкции отливки, представленной на рис. 2.2,а, плоскость разёма выполнена z-образной, что не только усложняет процесс изготовления пресс-формы, но и снижает размерную точность модели. Поэтому конструкцию отливки, по возможности, следует изменить, как это, например, представлено на рис. 2.2,б.

В процессе эксплуатации пресс-формы происходит износ, как её рабочих поверхностей, так и отдельных отъёмных частей. Наиболее сильному износу подвержены её трущиеся части (центрующие штыри и втулки, ползуны, стержни, пальцы и т.п.). Износ этих деталей приводит к увеличению зазора между ними и, следовательно, к увеличению относительного смещения отдельных частей пресс-формы относительно друг друга. В свою очередь, это смещение является одной из причин нарушения размерной точности изготавливаемых в ней моделей. Поэтому при выборе плоскости разёма пресс-формы желательно, чтобы вся модель отливки или её базовые поверхности, а также контролируемые по размерной точности элементы, находились в одной полуформе пресс-формы.

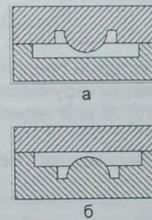


Рис. 2.2. Схемы разрезов пресс-форм

В качестве примера на рис. 2.3 представлены схемы разрезов пресс-форм, используемых для изготовления моделей отливки "Опора". Согласно схеме, представленной на рис. 2.3,а, часть поверхности модели отливки оформляется в верхней полуформе, а часть – в нижней. В этом случае, любое смещение полуформ относительно друг друга по плоскости разёма приведёт к нарушению размерной точности изготавливаемой в такой пресс-форме модели (соосности частей модели, поверхности которых выполняются в различных полуформах). В случае, когда все основные (базовые и контролируемые) поверхности модели оформляются в одной полуформе (см. рис. 2.3,б) любое относительное смещение полуформ пресс-формы не повлияет на размерную точность изготавливаемой модели и, соответственно, отливки.

Последовательность затвердевания отливки. Одной из задач, решаемой при обработке технологичности конструкции отливки, является создание условий её затвердевания, обеспечивающих получение плотного металла во всех частях тела литой детали.

В условиях промышленного производства литья абсолютно плотную (без усачной пористости) отливку получить практически невозможно, однако свести к ми-

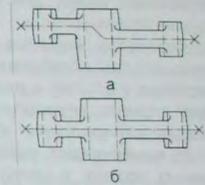


Рис. 2.2. Схема неправильной (а) и правильной (б) выполнения плоскости разёма пресс-формы отливки "Коромысло"

минимуму влияния усадочных дефектов на эксплуатационные свойства литой детали — задача выполнимая. Для этого конструкцию отливки следует выполнить такой, чтобы в процессе её затвердевания обеспечить достаточное питание расплавом всех её частей (элементов). Достаточность питания расплавом затвердевающей отливки обеспечивается созданием условий последовательного затвердевания условно выделенных, смежных, элементов отливки в направлении к прибыли или питателю.

Для предварительной оценки достаточности питания отливки расплавом в процессе её затвердевания используют наиболее простой и оперативный метод — метод вписанных окружностей (вписанных сфер). Для проведения оценки данным методом, предварительно определив положение отливки в пространстве, назначив соответствующие припуски для механической обработки отливки, а также места подвода расплава в отливку и места установки прибылей, по чертежу отливки определяют наиболее опасные сечения отливки с точки зрения образования в них рыхлот. После этого вычерчивают эскизы данных сечений и на полученных эскизах, в контуры стенок и термических узлов поэлементно вписывают (врисовывают) окружности и замеряют их диаметры.

На основании замеров и сопоставления диаметров окружностей, вписанных на каждом эскизе того или иного сечения детали (см. рис. 2.4), делают предварительное заключение о выполнении условия последовательности затвердевания выделенных смежных элементов отливки. Если диаметры вписанных окружностей последовательно увеличиваются от торца отливки или её теплового узла к месту, где предполагается установить питающий элемент ЛПС, то с питанием отливки в данном сечении проблем не ожидается. То есть, согласно методу вписанных окружностей, последовательность затвердевания элементов отливки выполняется, если:

$$D_1 < D_2 < D_3 < \dots < D_N, \quad (2.1)$$

где D_N — диаметр окружности, вписанный в элемент отливки, на который предполагается установить питающий элемент ЛПС, мм; D_1, D_2, D_3 — диаметры окружностей, вписанные в элементы отливки, последовательно удалённые от торца или термического узла отливки с диаметром вписанной окружности D_N , мм.

В качестве примера, рассмотрим условия питания отливки "Переходник", сечение которой схематично представлено на рис. 2.5.

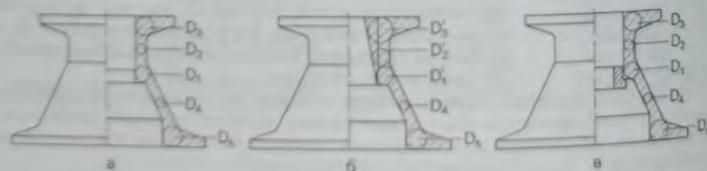


Рис. 2.5. Схемы для определения последовательности затвердевания смежных элементов отливки "Переходник"

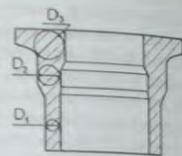


Рис. 2.4. Схема сечения отливки с вписанными окружностями

Для сечения отливки "Переходник", представленного на рис. 2.5, а, питание термического узла с диаметром вписанной окружности D_1 осуществляется через стенку отливки, как от верхнего, так и от нижнего фланца, где предполагается установить прибыль кольцевого типа. При этом в случае питания термического узла от верхнего фланца:

$$D_1 > D_2 < D_3, \quad (2.2)$$

В случае питания термического узла от нижнего фланца:

$$D_1 > D_4 < D_5, \quad (2.3)$$

То есть условие (2.1) для рассматриваемого термического узла при его питании со стороны фланцев отливки не выполняется и, следовательно, в термическом узле D_1 отливки следует ожидать образования усадочных дефектов.

Во избежание образования усадочных дефектов в термическом узле отливки необходимо изменить конструкцию отливки. С этой целью в отливке увеличивают толщину стенки, соединяющую данный узел и, например, верхний фланец, как это показано на рис. 2.5, б в виде напуска ($D_1' < D_2' < D_3'$), или на термический узел устанавливают стальной холодильник соответствующих размеров (см. рис. 2.5, в). Установка холодильника на термический узел повысит скорость затвердевания расплава в термическом узле и предупредит образование в нём усадочных дефектов.

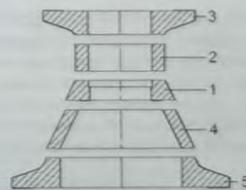


Рис. 2.6. Схема условного расчленения отливки "Переходник" на её отдельные элементы

Более трудоёмким, но более точным способом оценки последовательности затвердевания отдельных элементов отливки является метод, основанный на сравнении величин приведенных толщин или модулей охлаждения смежных элементов отливки. Данный метод предполагает условное расчленение отливки на отдельные элементы (см. рис. 2.6.), расчёт приведенной толщины (модуля охлаждения) каждого выделенного элемента и сравнения их значений между собой, как и в методе вписанных окружностей.

Приведенная толщина i — го элемента отливки (R_i) — это отношение площади поверхности S_i — го элемента отливки, соприкасающегося с формой ($S_i, \text{см}^2$) к периметру l_i — го элемента

отливки ($P_i, \text{см}$). Модуль охлаждения i — го элемента отливки (R_i') — это отношение объёма U_i — го элемента отливки ($U_i, \text{см}^3$) к площади поверхности i — го элемента отливки, соприкасающегося с формой ($S_i, \text{см}^2$).

То есть:

$$R_i = \frac{S_i}{P_i}, \quad (2.4)$$

$$R_i' = \frac{U_i}{S_i}. \quad (2.5)$$

Питание торцевой части отливки или стого—либо термического узла отливки считают достаточным, если выполняется условие:

$$R_1 < R_2 < R_3 < \dots < R_N \quad (2.6)$$

или

$$R_1^1 < R_2^1 < R_3^1 < \dots < R_N^1, \quad (2.7)$$

где R_N и R_N^1 — приведенная толщина и модуль охлаждения, соответственно, элемента отливки, на который предполагается установить питающий элемент ЛПС, см; R_1, R_2, R_3 и R_1^1, R_2^1, R_3^1 — приведенная толщина и модуль охлаждения, соответственно, элементов отливки 1, 2, 3, последовательно удалённых от торца или термического узла отливки с приведенной толщиной или модулем охлаждения, соответственно, R_1 или R_1^1 , см.

Применительно к отливке "Переходник" (см. рис. 2.6), обеспечение достаточности питания термического узла 1 будет обеспечено в случае, если:

$$R_1 < R_2 < R_3 \quad (R_1^1 < R_2^1 < R_3^1)$$

или

$$R_1 < R_4 < R_5 \quad (R_1^1 < R_4^1 < R_5^1)$$

Метод вписанных окружностей и приведенных толщин (модулей охлаждения) позволяет лишь в первом приближении оценить соблюдение принципа последовательности затвердевания элементов отливки, поскольку оба метода предполагают мгновенную заливку формы и не учитывают взаимного теплового влияния элементов отливки при кристаллизации расплава в форме. Тем не менее, несмотря на свою простоту, эти методы дают достаточно достоверный прогноз об условиях питания для относительно несложных отливок, получаемых в однородной по теплофизическим свойствам и состоянием форме (КО).

По сути, в вышеописанных методах оценки последовательности затвердевания отливки использован принцип сравнения длительности затвердевания расплава в каждом условно выделенном элементе отливки. При этом длительность затвердевания каждого элемента отливки, при всех прочих равных условиях, опосредованно, выражена либо через диаметр окружности, вписанной в сечение стенки отливки, либо через её приведенную толщину (модуль охлаждения). То есть, если время затвердевания i -го элемента отливки обозначить через τ_i , то условие последовательности затвердевания отливки в целом выглядит следующим образом:

$$\tau_1 < \tau_2 < \tau_3 < \tau_4 \dots < \tau_N, \quad (2.8)$$

где обозначения индексов те же, что и в условии (2.1).

Необходимо отметить, что в реальных условиях получения отливок нередко, при всей очевидности выполнения условий (2.1), (2.6) или (2.7), не удаётся избежать образования усадочных дефектов в отливке. Это связано, в частности, с тем, что течение расплава в форме при заливке в ряде случаев кардинально изменяет температурное поле КО и, вместе с тем, последовательность затвердевания элементов отливки. Для таких отливок оценку последовательности затвердевания необходимо

проводить с использованием методов математического моделирования и применением вычислительной техники, добиваясь выполнения условия (2.8).

Толщина стенок отливок. Рассматривая вопрос о толщине стенок отливки, прежде всего следует учитывать возможность получения её модели соответствующего качества. При этом следует принимать во внимание свойства используемого модельного состава, а также технологические возможности оборудования и оснастки, используемых для изготовления моделей.

Ориентировочно номинальную толщину стенок для отливок, получаемых в условиях заливки под действием гравитации, в зависимости от габаритных размеров отливок (L), автор рекомендует рассчитывать по формуле:

$$\delta_N = N \cdot L^n, \quad (2.9)$$

где N и n — коэффициенты.

Минимальную толщину стенок для отливок, получаемых в условиях заливки под действием гравитации, в зависимости от габаритных размеров отливок, можно считать по формуле:

$$\delta_{MIN} = M \cdot L^m, \quad (2.10)$$

где M и m — коэффициенты. Значения коэффициентов, входящих в уравнения (2.9) и (2.10), приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1
Значения коэффициентов, входящих в уравнения (2.9) и (2.10), для некоторых сплавов.

Сплав	Значения коэффициентов			
	N	n	M	m
Сталь	0,75	0,33	0,37	0,38
Чугун	0,63	0,33	0,31	0,37
Бронза	0,66	0,33	0,45	0,33
Сплавы алюминиевые	1,1	0,25	0,46	0,33
Сплавы никелевые, жаропрочные	0,73	0,33	0,35	0,38

Значения величин толщин стенок, полученные в результате расчёта по уравнениям (2.9) и (2.10), являются ориентировочными, поскольку вопрос о толщине стенок отливки, как правило, решает конструктором. Тем не менее, ориентируясь на минимально-допустимую толщину стенок в отливке, необходимо помнить, что слишком малая толщина стенки может привести к образованию различных дефектов: недоливу, спаям, трещинам, окисным плёнам, развитой усадочной пористости или короблению, а также может потребовать существенного усложнения литниковой системы и технологии изготовления отливки. Кроме того, у чугунных отливок чрезмерно малая толщина стенок отливки в сочетании с относительно низкой начальной температурой КО может привести к отбелу чугуна в этих стенках или их кромкам.

Рассматривая вопрос о толщине стенок отливки, следует отметить, что в некоторых случаях, с целью снижения массы отливки, целесообразно осуществлять уменьшение толщины стенки отливки за счёт выполнения на ней торцевого бурта. В качестве примера на рис. 2.7 представлены схемы двух отливок, где на схеме (а) представлена исходная конструкция отливки, а на схеме (б) та же отливка, но с буртом.

При получении литых деталей типа колец или полых цилиндров необходимо учитывать возможность появления в отливках эллипсности, величина которой возрастает с увеличением диаметра отливки и уменьшением толщины стенки отливки. Образование эллипсности отливки может произойти на стадии изготовления моде-

ли, прокаливания КО или (и) охлаждения отливки. Для уменьшения эллипсности в отливке необходимо при назначении толщины стенок предусмотреть соответствующий припуск на механическую обработку, в крупных отливках – предусмотреть установку симметричных технологических стяжек, как, например, это схематично представлено на рис. 2.8.

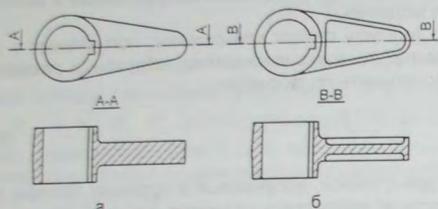


Рис. 2.7. Схемы конструкций отливки "Рычаг"

Технологические стяжки используют не только для предупреждения образования эллипсности в отливках, но и в тех случаях, когда, во избежание последующей рихтовки отливки, следует соблюсти параллельность её отдельных тонких протяжённых стенок. На рис. 2.9 в качестве примера представлена одна из таких отливок 1 с технологической стяжкой 2.

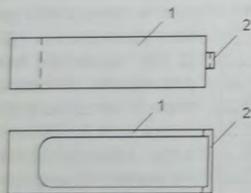


Рис. 2.9. Отливка "Вилка", с технологической стяжкой

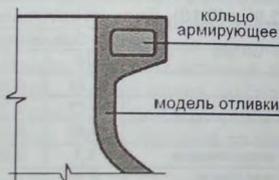


Рис. 2.10. Разрез модели отливки кольцевого типа, с армирующим стержнем во фланце

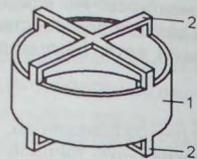


Рис. 2.8. Пример выполнения технологических стяжек (2) на отливке "Кольцо" (1)

тельным ростом твердой фазы при кристаллизации расплава в форме герметичности зависит от ширины зоны двухфазного состояния сплава. При этом практически непроницаемой является так называемая литейная корочка – наиболее плотная поверхностная часть металла в стенке отливки.

Следует отметить, что с уменьшением толщины стенки отливки повышается как величина осевой усадочной пористости, так и относительная ширина пористой зоны в поперечном сечении стенки отливки, то есть уменьшается относительная толщина литейной корочки в отливке.

При всех прочих равных условиях, уменьшить величину усадочной пористости в стенке отливки можно путём выполнения на ней напуска, непрерывно увеличивающегося в направлении к питающему стенку элементу ЛПС. Величину напуска целесообразно выполнить из расчёта 5...10% от протяжённости питаемой стенки отливки. То есть, если, например, толщина стенки отливки составляет 4 мм, а её длина (от торца к прибыли) – 80 мм, то уклон следует выполнить таким, чтобы толщина стенки отливки неуклонно возрастала и под прибылью составляла 8...12 мм.

Сечение отливки с напуском схематично представлено на рис. 2.11, а, где обозначены: 1 – прибыль, 2 – напуск отливки, 3 – отливка (контуры отливки обозначены пунктирной линией). Влияние величины напуска на плотность плоских отливок, изготовленных из стали 50Л, можно оценить по зависимости, представленной на рис. 2.11, б [66; 101].

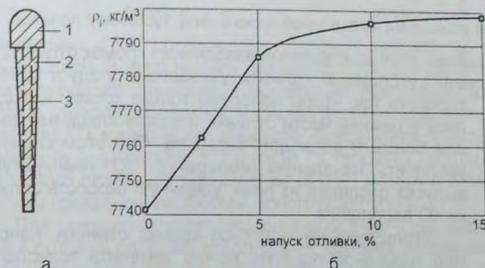


Рис. 2.11. Разрез отливки с напуском (а) и зависимость плотности (б) плоской отливки от величины напуска на ней

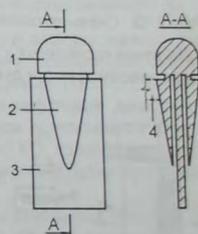


Рис. 2.12. Схема выполнения приливов вдоль стенки отливки

Другим способом уменьшения величины усадочной пористости в стенке отливки, не прибегая к увеличению её толщины за счёт выполнения напуска, является усиление эффекта последовательности затвердевания расплава в форме в пределах одной стенки отливки. Например, для получения отливок с пористостью 0,15% из жаропрочного никелевого сплава необходимо в отливке длиной 240 мм и толщиной стенки 2 мм создать градиент температур по высоте в 500°C с температурой в нижней части формы 860°C и верхней – 1360°C [72].

В обычных условиях получения отливок создание высокого градиента температуры по высоте заливки КО не всегда представляется возможным. Поэтому наиболее простым, но металлоёмким, способом повышения последовательности затвердевания расплава в пределах одной стенки отливки является выполнение приливов вдоль этой стенки, что схематично представлено на рис. 2.12.

Увеличение сечения приливов 2 в направлении от торца стенки отливки 3 к прибыли 1 (см. рис. 2.12, где место подвода питателя обозначено цифрой 4) создаёт условия последовательной кристаллизации расплава в самой отливке. В таких ус-

ловия последовательного затвердевания рост твёрдой фазы в отливке происходит преимущественно от нижнего и боковых торцов отливки к её центру, обеспечивая хорошие условия питания приливов тем выше, чем ближе они расположены к отливке и чем больше разница толщин на их торцах.

Толщина кромок отливок. При назначении толщины стенки отливки, принимают во внимание и толщину её кромок, где, в основном, образуются такие дефекты, как спай и недоливы, засоры и неоформление тела отливки.

Рекомендуемая минимально-допустимая толщина кромок отливки не должна быть менее 0,3...0,4 мм. Для отливок, работающих при повышенных температурах (например, турбинные лопатки, роторы, крыльчатки и т.п.), толщина кромки должна быть не менее 0,6...0,7 мм.

В случае необходимости выполнения кромки меньшей толщины, рекомендуется выполнить на ней технологическое утолщение, впоследствии удаляемое при механической обработке. Некоторые схемы выполнения утолщения 2 на кромке отливки 1 (например, выходной кромке пера турбинной лопатки) представлены на рис. 2.13.



Рис. 2.13. Схемы выполнения утолщения на выходной кромке пера турбинной лопатки

Наличие кромочных утолщений улучшает условия заполнения кромок отливок. В случае невозможности выполнения утолщений, отливку при заливке следует ориентировать так, чтобы наиболее тонкие кромки находились в нижней части отливки и заполнялись верхним или боковым подводом расплава. При этом следует увеличить: начальную температуру КО, температуру выпуска расплава из печи, удельную скорость заливки КО расплавом.

Утолщение на выходной кромке отливки, например турбинной лопатки, можно заменить технологическим приливом, что схематично представлено на рис. 2.14. Такой технологический прилив выполняет несколько функций:

- обеспечивает полноту заполнения кромки отливки расплавом;
- предотвращает значительное коробление кромки отливки;
- предотвращает образование трещин на выходной кромке отливки;
- является соросборником рабочей полости КО.

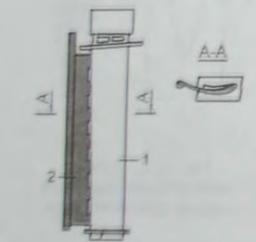


Рис. 2.14. Схема выполнения технологического прилива (2) на выходной кромке турбинной лопатки (1)

Прилив на кромке выполняют заедино с моделью, в пресс-форме и удаляют с торца отливки механически, после проведения термообработки отливки.

Стенки отливок с плоскими поверхностями. Стенки отливок с плоскими поверхностями (с размерами поверхности более чем 50x50 мм) не всегда удаётся получить абсолютно плоскими (см. рис. 2.15,а). Как правило, такие поверхности отливок имеют определённую "выпуклость" или "вогнутость" поверхности, что схематично представлено на рис. 2.15,б и 2.15,в соответственно.

"Выпуклая" форма у плоских стенок характерна для отливок, получаемых в КО без опорного наполнителя. Основной причиной образования "выпуклости" стенки

отливки является недостаточная жёсткость используемой КО. В связи с этим, с целью предупреждения "раздутия" стенки отливки, увеличивают количество слоёв КО, для обсыпки последних трёх-четырёх слоёв КО используют крупную крошку, полу-металла и начальную температуру КО, понижают температуру заливки технологические отверстия, на стенке отливки выполняют технологические рёбра и т.п.

"Вогнутая" формы плоской поверхности стенки отливки характерна для отливок,

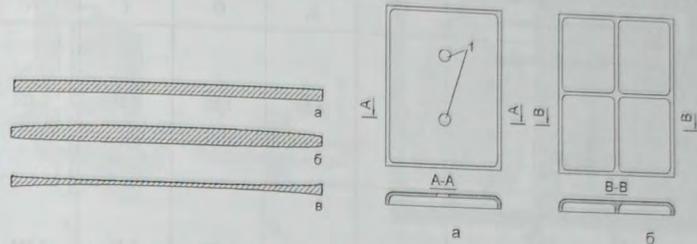


Рис. 2.15. Сечения плоской стенки отливки

Рис. 2.16. Отливки с технологическими отверстиями (а) и рёбрами жёсткости (б)

полученных в КО, обладающих недостаточной жёсткостью и заформованных в сыпучий опорный наполнитель, материал которого имеет значительный коэффициент расширения (например, кварцевый песок). "Вогнутая" форма плоской поверхности стенки отливки образуется в результате деформации (сжатия) КО материалом опорного наполнителя в процессе прокаливания формы. Величина деформации КО зависит от толщины (жёсткости) КО, коэффициента термического линейного расширения (КТЛР) материала опорного наполнителя, температуры прокаливания формы, конструкции опоки и т.п.

Для предупреждения или снижения величины прогиба стенок КО, заформованной в сыпучий опорный наполнитель, следует использовать более жёсткую КО, либо в качестве огнеупорного наполнителя использовать крупнокосую огнеупорный материал с низкой величиной КТЛР (например, шамотную крошку, вспученный вермикулит, бой КО и пр.), при формовке КО в опорный наполнитель по периметру опоки выполнить термокомпенсационный зазор, изменить конструкцию отливки и пр. Изменение конструкции отливки, в данном случае, предполагает выполнение в ней технологических отверстий (см. рис. 2.16,а) или выполнение на её поверхности технологических рёбер жёсткости (см. рис. 2.16,б), которые впоследствии удаляют с поверхности отливки механической обработкой [153].

Плоскости отливок с размерами более чем 100x100 мм следует выполнять изогнутыми, либо с технологическими отверстиями (окнами). Технологические отверстия в стенке толщиной δ следует выполнять диаметром, равным $(3...4)\delta$, но не менее 5 мм (см. рис. 2.16,а). Расстояние между технологическими отверстиями или технологическим отверстием и торцом отливки не должно превышать 50 мм. Впоследствии технологические отверстия в теле отливки заваривают.

Наличие технологических отверстий (окон) в модели обеспечивает надёжное соединение противоположащих стенок КО и предупреждает их значительную деформацию. То есть выполнение на отливке рёбер жёсткости или (и) технологических окон повышает общую жёсткость КО, чем препятствует деформации её стенок под

действием металлостатического напора, воздействию со стороны опорного наполнителя и т.п.

Рекомендуемые размеры рёбер жёсткости приведены в табл. 2.2 [7]. Контуры ребра рекомендуется выполнять по параболе с плавным переходом контура поверхности ребра в тело отливки.

Рекомендуемые размеры рёбер жёсткости

Таблица 2.2

Сопрягаемые элементы	H	δ_1	D	r	r_1
Стенка с рёбрами посередине	$\leq 5\delta$	0,8 δ	1,5 δ	0,5 δ	0,25 δ
Стенка с рёбрами по краям	$\leq 5\delta$	δ	1,25 δ	0,3 δ	0,25 δ

Примечание. Размеры δ и D принимают конструктивно. Толщина наружных рёбер не должна превышать 0,8 и внутренних 0,6...0,7 толщины сопрягаемой стенки.

Понятие «жёсткая» КО относительно и зависит от габаритных размеров плоских стенок отливки, величины металлостатического напора в форме, толщины стенок КО и их пространственной структуры, типа используемого опорного наполнителя и т.п. Одним из путей увеличения жёсткости КО является изменение пространственной структуры тела КО путём выполнения ложных рёбер.

Сущность данного технологического приёма рассмотрим на примере плоской отливки 1 (см. рис. 2.17,а), на модели которой установлены ложные рёбра 2 (для упрощения изображения на рис. 2.17,а ложные рёбра изображены с одной стороны модели отливки, а отливка «Пластина» представлена без ЛПС).

На рис. 2.17,б представлен вид сечения КО (в области сечения А на рис. 2.17,а) после выплавления из неё модельного состава. Из рис. 2.17,б видно, что в результате установки ложных рёбер стенки КО 5 приобретают определённую пространственную структуру 4 в области рабочей полости КО 3.

На рис. 2.17, (в, г) представлены двусторонние рельефы поверхностей плоских отливок (компьютерная обработка) с размерами 100×150×6 мм, полученными в семислойной КО, изготовленной на основе гидролизованного раствора этилсиликата в этиловом спирте, пылевидного кварца и кварцевого песка. В момент заливки сталью 08Х14Н7МЛ температура КО составляла 960±10°С. Места установки на отливках питателей на рис. 2.17,в, г отмечены окружностями и прямоугольниками.

Отливка, рельеф которой представлен на рис. 2.17,в, получена по модели, на которой были установлены ложные рёбра, а отливка, рельеф которой представлен на рис. 2.17,г, получена по модели, на которой ложные рёбра отсутствовали.

На рис. 2.17 (в, г) каждое последующее двустороннее увеличение толщины отливки на 0,05 мм от предыдущего значения, начиная от её торцевых поверхностей, отмечено соответствующим оттенком.

Анализ изображений, представленных на рис. 2.17,в и рис. 2.17,г, показывает, что у отливки, полученной по модели без ложных рёбер жёсткости, наибольшее двустороннее отклонение (увеличение) толщины стенки от номинального значения установкой ложных рёбер жёсткости, полученная по модели с двусторонней толщиной стенки до 0,10 мм.

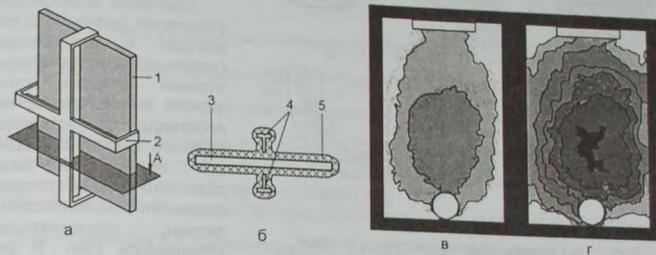


Рис. 2.17. Схема расположения ложных рёбер на одной из сторон плоской отливки (а), схема разреза выплавленной КО по плоскости А при двустороннем расположении ложных рёбер (б) и компьютерное изображение полей отклонений толщины стенки плоской отливки от номинальной при использовании двусторонних ложных рёбер (в) и без них (г)

Ложные рёбра (см. рис. 2.18) автор рекомендуется выполнять с I-образным или Т-образным сечением, высотой h и с величиной основания 3±1 мм. Ложные рёбра устанавливают с шагом 30...100 мм. Высоту ложных рёбер автор рекомендует рассчитывать по эмпирическому уравнению (мм):

$$h = 0,15 \cdot \sqrt[0,25]{S \cdot \sqrt{H}}, \quad (2.11)$$

где H – величина металлостатического напора над средним сечением стенки отливки, над которой выполняют ложные рёбра, мм; S – площадь поверхности стенки отливки, над которой выполняют ложные рёбра, мм².

Расстояние между телом отливки и основанием ложного ребра должно быть таким, чтобы это пространство было заполнено огнеупорным покрытием (при изготовлении КО), после нанесения на модельный блок 4...5 слоёв огнеупорного покрытия.

После заливки, охлаждения и выбивки залитого блока ложные рёбра с поверхности отливки срезают, а места крепления рёбер зачищают.

Следует отметить, что ложные рёбра можно крепить не только к модели отливки, но и элементам ЛПС, соблюдая при этом соответствующее расстояние от ребра до поверхности отливки.

Переходы и сопряжения стенок. В процессе обработки конструкции литой детали на технологический процесс особое внимание необходимо уделить оформлению углов и переходов от стенки к стенке отливки. Правильное выполнение сочленения стенок является основной причиной образования в этих местах горячих трещин, усадочных раковин и рыхлот, что схематично

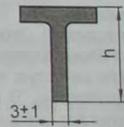


Рис. 2.18. Сечение ложного ребра

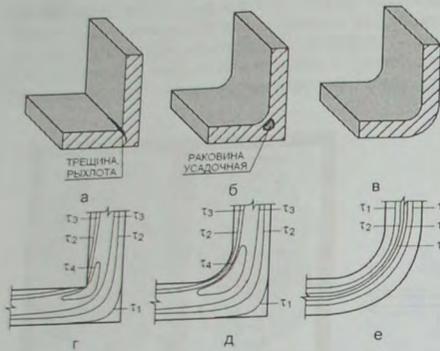


Рис. 2.19. Сечения сопряжений стенок отливок одинаковой толщины, расположенных под углом 90°

тонких стенках отливки превышает скорость затвердевания расплава в их термическом узле, что, собственно, и является причиной образования усадочных дефектов в данных сопряжениях стенок.

В качестве примера на рис. 2.19, г...е представлены схемы положений фронтов затвердевания расплава в L-образном сопряжении различной конструкции, через одинаковые промежутки времени затвердевания (τ) расплава в узле отливки, где $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$. Анализ схем, представленных на рис. 2.19, г...е, свидетельствует, что с уменьшением радиуса галтели между сопрягающимися стенками отливки увеличивается вероятность появления в сопряжении усадочных дефектов, выходящих на поверхность отливки.

Для предупреждения образования дефектов засорного и усадочного типа переходы в местах сочленения стенок необходимо выполнять плавными, избегая острых углов, как это, например, представлено на рис. 2.19, в.

Наличие прямых и острых внутренних углов в отливке и элементах ЛПС так же повышает опасность появления в отливке засора. Это связано с тем, что внутренний угол модельного блока формирует внешний угол формы (КО), кромка которого зачастую не обладает достаточной прочностью и термостойкостью. В результате этого, при прокаливании или в результате динамического воздействия потока расплава, заливаемого в форму, данная кромка частично скалывается и её частицы попадают в рабочую полость формы, формируя засор отливки. Поэтому все внутренние углы модельного блока, по возможности, следует выполнять с небольшим закруглением, как это, например, представлено на рис. 2.20 для модели прибыли.

В случае ступенчатого изменения толщины стенки отливки, переход от тонкой к толстой части стенки следует выпол-

представлено на рис. 2.19, а, б. Во избежание этого переходы стенок рекомендуется выполнять закруглёнными, как, например, это представлено на рис. 2.19, в.

Причиной образования усадочных дефектов в переходах и сопряжениях (термических узлах) стенок отливок является пониженная интенсивность теплоотвода от затвердевающего расплава в данном термическом узле, обусловленная конфигурационными особенностями формы, оформляющей термический узел. В результате этого, скорость затвердевания расплава в

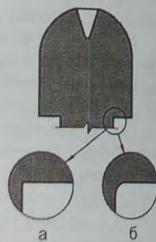


Рис. 2.20. Схема неправильного (а) и правильного (б) выполнения внутреннего угла модели

нить клинообразным или галтелью, что схематично представлено на рис. 2.21. Рекомендуемое отношение толщин сопрягаемых стенок отливки не должно превышать 4:1.

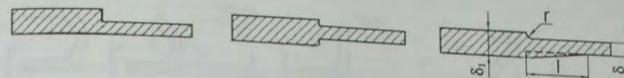


Рис. 2.21. Схемы параллельного сопряжения стенок отливки

Переход от одного сечения стенки отливки к другому с помощью галтелей выполняют для любых деталей при соотношении толщин сопрягаемых стенок $\frac{\delta_1}{\delta} \leq 2$.

При этом (см. рис. 2.21) радиусы галтелей принимают [7]:

– для деталей из чугуна, алюминиевых и магниевых сплавов $r=0,3(\delta_1-\delta)$;

– для деталей из стали и медных сплавов $r=0,4(\delta_1-\delta)$.

Переходы сечений отливок при соотношении толщин сопрягаемых стенок отливки $\frac{\delta_1}{\delta} > 2$ рекомендуется выполнять исходя из характера нагрузок, действующих на

литую деталь в процессе её эксплуатации. В случае, если деталь не испытывает ударных нагрузок, то сопряжения стенок следует выполнять радиусами (галтелями) с размерами, указанными выше. Если деталь в процессе эксплуатации подвергается ударным нагрузкам, то переход между стенками следует выполнять клиновым, что схематично представлено на рис. 2.21. Длину участка перехода (l) от тонкой к толстой стенке отливки принимают равной: $l > 4(\delta_1-\delta)$ – для деталей из чугуна, алюминия и магниевых сплавов, $l > 5(\delta_1-\delta)$ – для деталей из стали и медных сплавов.

При выполнении галтелей рекомендуется использовать следующий нормальный ряд радиусов закруглений в углах отливок: 1, 2, 3, 5, 8, 15, 20, 25, 30, 40 мм. При этом в пределах одной отливки необходимо стремиться к минимальному числу разнообразий величин радиусов закруглений.

При сопряжении двух стенок различной толщины под углом (см. рис. 2.22) соотношения толщин и длину участка перехода между стенками назначают по условиям, указанным при сопряжении двух параллельных стенок.

Не рекомендуется использовать сопряжения стенок под углом менее 50°. При этом наиболее важной величиной сопряжения является величина радиуса галтели внутреннего угла. Величину радиуса галтели определяют в зависимости от величины внутреннего угла сопряжения и толщин сопрягаемых стенок по формуле:

$$r = \frac{45 \cdot (\delta_1 + \delta)}{45 + \alpha} \quad (2.12)$$

где r – радиус галтели, мм; δ_1 и δ – толщины сопрягаемых стенок отливки, мм;

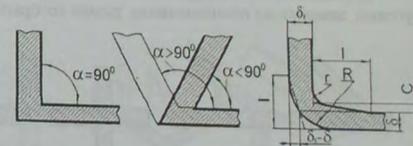


Рис. 2.22. Схемы сопряжения двух стенок отливки $\delta_1 \leq 4\delta$; $l \geq 4(\delta_1-\delta)$; $C=\delta_1-\delta$; $r=(\delta_1+\delta)/S$; $R=\delta_1+r$

α – внутренний угол сопряжения стенок, град.

Величину внутреннего угла сопряжения стенок отливки (α) определяют по чертежу разреза стенки отливки, используя схемы, представленные на рис. 2.23.

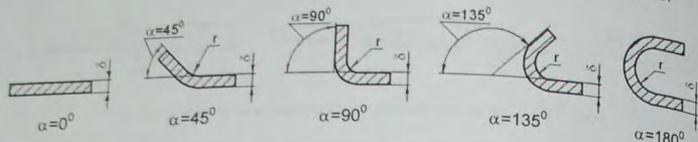


Рис. 2.23. Схемы сочленения двух стенок отливки

В случае сопряжения трёх, четырёх и более стенок (см. рис. 2.24), определение величин сопряжения следует проводить по формулам расчёта для двух стенок.

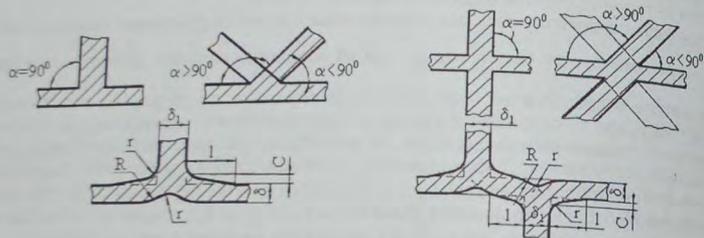


Рис. 2.24. Схемы сопряжения трёх и четырёх стенок отливки

По возможности следует избегать выполнения сочленений стенок под острыми углами, заменяя их сочленениями, схемы которых представлены на рис. 2.25.

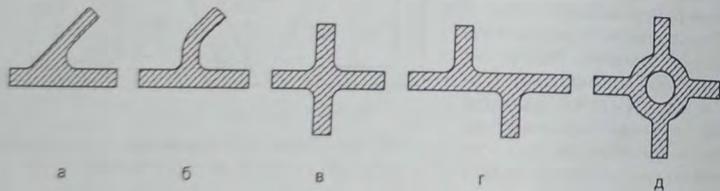


Рис. 2.25. Схемы не рекомендуемого (а, в) и рекомендуемого (б, г, д) выполнения сочленения трёх и четырёх стенок отливки

Орнаментирование поверхностей тонких стенок отливок корпусного типа.

Для повышения жесткости КО, улучшения её заполняемости расплавом, снижения усадочных напряжений в отливке, предупреждения образования трещин и снижения массы на внешних или нерабочих поверхностях тонких протяжённых стенок отливок корпусного типа рекомендуется выполнять одностороннее орнаментирование по-

верхности с одновременным уменьшением толщины этих стенок на высоту выполняемого орнамента, что схематично представлено на рис. 2.26 [233].

Профиль орнамента для стенок отливки толщиной $\delta \leq 5$ мм рекомендуется выполнить в виде полуokrуга радиусом:

$$r = (0,2 \dots 0,5) \delta$$

и радиусом $r = 3$ мм для отливок с толщиной стенок более 5 мм. Шаг выполнения элементов орнамента $l = (5 \dots 10) \delta$, угол пересечения элементов орнамента $\alpha = 90^\circ$ или $\alpha = 45^\circ$ (см. рис. 2.26).

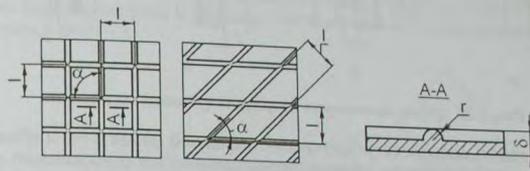


Рис. 2.26. Схемы орнамента на тонких стенках отливок

Временные технологические рёбра. Временные (внешние и внутренние) технологические рёбра (см. рис. 2.27) применяют для предотвращения образования трещин в различных сопряжениях стенок, в том числе и на термических узлах отливок. Впоследствии временные технологические рёбра с поверхности отливки удаляют механическим путём.

Если толщина наиболее тонкой стенки отливки, на которую устанавливаются временные технологические рёбра (ребро), равна δ , то рекомендуемая толщина временных технологических рёбер (ребра) должна быть в пределах от $0,2 \cdot \delta$ до $0,4 \cdot \delta$, а их (его) высота равна $(2 \dots 4) \cdot \delta$.

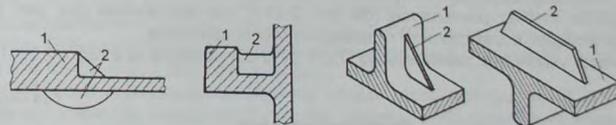


Рис. 2.27. Схемы выполнения на отливках (1) временных технологических рёбер (2)

На протяжённые термические узлы отливок временные технологические рёбра рекомендуется устанавливать на расстоянии друг от друга – $(3 \dots 5) \cdot \delta$.

Конусность стенок отливок (уклоны). Конусность (уклоны) выполняют в пресс-формах для обеспечения свободного извлечения модели или металлического стержня (стержней) из модели. Уклоны по наружным поверхностям отливки выполняют в направлении извлечения модели из пресс-формы. Уклоны по внутренним поверхностям – в направлении удаления стержней и вкладышей из модели.

В соответствии с ГОСТ 3212-92 конусность может быть выполнена по трём схемам: с увеличением, с уменьшением или одновременным увеличением и уменьшением толщины стенки отливки. При этом величину конусности и уклонов на один и тот же размер назначают в зависимости от материала пресс-формы и требований,

предъявляемых к поверхности отливки. Относительные высоты стелки отливки конусность может быть задана в градусах или миллиметрах.

Схемы выполнения конусности (уклонов) на отливках приведены на рис. 2.28, где Н.Р.О. – номинальный размер отливки.

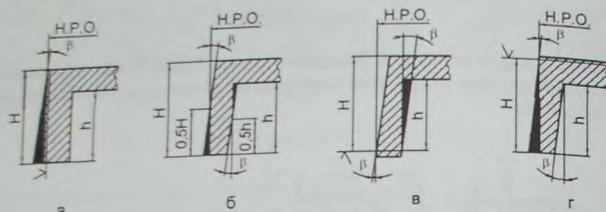


Рис. 2.28. Схемы выполнения конусности (уклонов) на отливках

Для необрабатываемых стенок отливок с толщиной менее 3 мм и обрабатываемых перпендикулярных стенок отливок (перпендикулярных относительно поверхности разъёма пресс-формы) конусность назначается в "плюс" (см. рис. 2.28,а).

Для стенок с толщиной 3...6 мм конусность преимущественно дают в "плюс-минус" (см. рис. 2.28,б), а при толщине стенок более 6 мм – в "минус" (см. рис. 2.28,в, г).

Уклоны следует выполнять:

- на обрабатываемых поверхностях отливки сверх припуска на механическую обработку, за счёт увеличения размеров отливки (см. рис. 2.28,а). При этом, допускается выполнение уклонов за счёт уменьшения припуска, но не более 30% его значения;

- на необрабатываемых поверхностях отливки, не сопрягаемых по контуру с другими деталями, за счёт увеличения и уменьшения размеров отливки (см. рис. 2.28,б);

- на необрабатываемых поверхностях отливки, сопрягаемых по контуру с другими деталями, за счёт уменьшения (см. рис. 2.28,в) или увеличения (см. рис. 2.28,г) размеров отливки, в зависимости от поверхностей сопряжения.

Значения уклонов, установленные ГОСТ 3212-92, приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Величины уклонов

Высота модели, мм	Уклон			
	для наружных поверхностей		для внутренних поверхностей	
	β	мм	β	мм
До 10	30°	0,08	1° 30'	0,26
10–16	20°	0,09	1° 00'	0,28
16–25	15°	0,10	45'	0,33
25–40	15°	0,16	45°	0,52
40–63	10°	0,18	30°	0,55
63–100	10°	0,29	30°	0,87

Примечание: При изготовлении моделей в ручных пресс-формах значения уклонов могут быть увеличены в 1,5 раза по сравнению с величинами, указанными в таблице.

Отверстия в отливках. В литье по выплавляемым моделям отверстия в отливках выполняют стержнями, являющимися частью тела КО и сформированными в процессе изготовления КО, либо с помощью специально изготовленных стержней (керамических, графитовых).

В случае, если стержень является частью тела КО, то диаметр сквозного отверстия не должен быть менее 5 мм, а его протяжённость (l) должна быть не более трёх диаметров отверстия (см. рис. 2.29,а...в). Данное ограничение по размерам объясняется плохими условиями сушки огнеупорного покрытия в узких отверстиях, что является причиной недостаточно высокой прочности и осыпавости лицевого слоя КО на данном участке. Кроме того, огнеупорные суспензии, обладающие достаточно высокой вязкостью, не всегда могут проникнуть в узкие полости и отверстия модели. В результате этого отверстие в отливке, частично или полностью, может оказаться заполненным металлом.

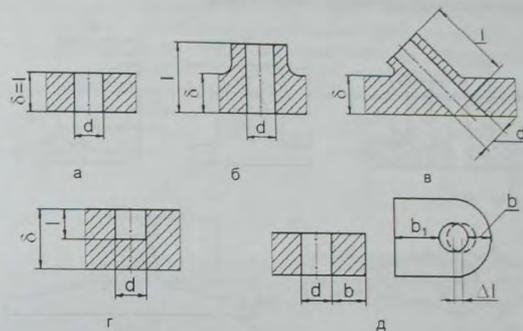


Рис. 2.29. Схемы выполнения отверстий в стенке отливки

Для выполнения отверстий меньшего диаметра (от 5 до 1 мм) следует использовать керамические стержни (для отливок из титановых сплавов – графитовые стержни). Отверстия диаметром менее 1 мм в отливке выполняют механическим путём или каким-либо другим способом.

Наибольшая рекомендуемая глубина "глухих" отверстий (см. рис. 2.29,г) – не более одного диаметра отверстия ($l \leq d$), при условии, если диаметр отверстия более 5 мм.

При получении отверстия с "жёсткими" допусками по размерам или отверстия, впоследствии сопрягающегося с отверстием в другой детали, в таких отверстиях назначают припуск на механическую обработку.

В том случае, если отверстие расположено на торце отливки, неравномерность толщины тела отливки может привести к эллипсности отверстия (Δl), что схематично представлено на рис. 2.29,д. В связи с этим для определения расстояния расположения отверстия от края отливки следует руководствоваться следующими указаниями:

$$b \geq d \geq 5 \text{ мм.}$$

При этом, $\Delta l = 0$, если $b_1 \leq 1,5b$

Пазы. На рис. 2.30 представлена схема узла стенки отливки с параллельными между собой ребрами, образующими паз. Минимальное расстояние между ребрами должно быть не менее $4...5$ мм при $H \leq 2d$ для легкоплавких цветных сплавов и чугуна, и $H \leq d$ для легкоплавких цветных сплавов.



Рис. 2.30. Схема выполнения паза

Наличие глубоких пазов в отливке нежелательно, поскольку в глубоком пазу довольно сложно обеспечить надлежащее качество сушки огнеупорного покрытия в процессе изготовления КО. Помимо этого, в торцевой части паза, как правило, образуются дефекты усадочного характера и затруднено удаление КО в процессе очистки отливки от остатков формы.

Выступы и бобышки. Выступы и бобышки на отливке в местах сквозных отверстий в стенке отливки (см. рис. 2.31) выполняют с целью повышения конструкционной прочности данного узла.

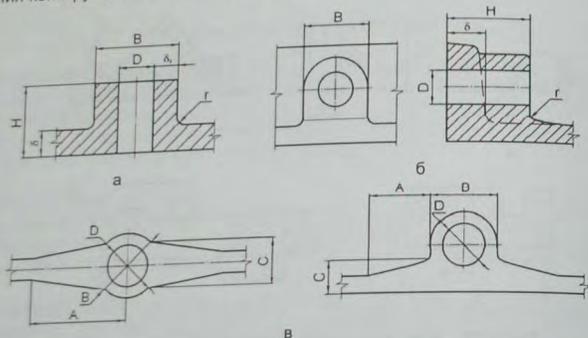


Рис. 2.31. Выступы и бобышки на отливках

Высоту бобышки (см. рис. 2.31), как правило, назначают либо исходя из конструктивных соображений, либо высотой не более толщины стенки отливки, либо рассчитывают по одной из формул:

$$H = (4...6) \cdot D, \quad (2.13)$$

$$H \geq 2,5 \delta, \quad (2.14)$$

где D – диаметр отверстия в бобышке, мм; δ – толщина стенки отливки, на которой выполнена бобышка, мм.

Толщину стенки бобышки назначают в зависимости от толщины стенки отливки, используя уравнение:

$$\delta_1 = (1,0...1,5) \cdot \delta. \quad (2.15)$$

В этом случае наружный диаметр бобышки составит:

$$B = D + (2...3) \cdot \delta. \quad (2.16)$$

С тонким телом отливки бобышки должны сочленяться плавно по большим радиусам и конусным поверхностям в пределах $30^\circ...50^\circ$.

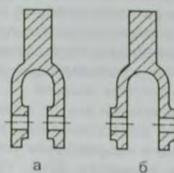


Рис. 2.32. Схема нерекомендуемого (а) и рекомендуемого (б) расположения бобышки

Для отверстий, расположенных на торце стенки отливки, форму выступа конструируют в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2.31, в, где $H=2,25 \cdot D$; $C=0,5 \cdot B$; $A=1,5 \cdot B$.

Если отверстие является базовым и оно подвергается механической обработке, то диаметр выступа назначают минимальным. Для небазовых отверстий диаметр выступа назначают с учетом допусков на размер от базовой поверхности до центра выступа.

При конструировании отливок бобышки рекомендуют располагать не на внутренних (см. рис. 2.32, а), а на внешних (см. рис. 2.32, б) поверхностях отливки. Рекомендуемое расположение бобышек объясняется упрощением конструкции пресс-формы, используемой для изготовления моделей данных отливок.

Внутренние полости и поднутрения. Учитывая возможности и особенности изготовления моделей и КО, в конструкциях литых деталей следует избегать глубоких полостей (карманов, канавок, поднутрений). В противном случае наличие таких полостей не позволит получить в этих частях КО требуемого качества из-за плохих условий её сушки.

В результате плохой просушенности лицевой слой в данных частях КО может быть разрушен в процессе прокаливания КО и её заливки. Кроме того, наличие протяженных полостей является основной причиной образования в отливке дефектов газоусадочного характера и нарушения размерной точности отливки.

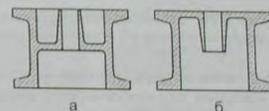


Рис. 2.33. Схемы нетехнологичного (а) и технологичного (б) выполнения отливки

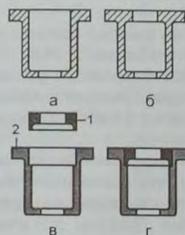


Рис. 2.34. Конструкции нетехнологичной (а) и технологичной (б) отливки, этапы выполнения составной модели отливки (в, г)

В качестве примера на рис. 2.33 представлены разрезы модели отливки с указанием её нетехнологичного и технологичного исполнения. Изменения (см. рис. 2.33, б) в конструкции отливки, представленной на рис. 2.33, а, обеспечивают, прежде всего, достаточно хорошие условия питания внутренних стенок отливки в процессе кристаллизации металла отливки и предотвращают образование рыллот и горячих трещин в области сочленения горизонтальной стенки с внешней стенкой отливки.

Модели отливок с нетехнологичными полостями выполняют составными или с применением керамических или водорастворимых стержней. В качестве примера на рис. 2.34 представлен разрез технологичной (а) и нетехнологичной (б) конструкции отливки. В случае невозможности изменения нетехнологичной конструкции отливки (см. рис. 2.34, б) модель отливки выполняют с использованием керамического или водорастворимого стержня, либо делают составной, по схеме, представленной на рис. 2.34, в, г.

В данном случае, для изготовления составной модели, отдельно, изготавливают модель стакана отливки 2 и модель вкладыша 1. Модель вкладыша выполняют таким образом, что бы он плотно входил в тело модели стакана (см. рис. 2.34, г). При сборке модель вкладыша вручную вставляют в стакан. Если рассматриваемая модель отливки достаточно крупная, то внутреннюю полость отливки следует монтировать с помощью водорастворимого стержня или с помощью вкладыша, по вышеописанной схеме, с последующей шпателькой (запаиванием или замазыванием) ремонтным модельным составом щелей между составными элементами модели. Внутренние полости в отливках следует выполнять без уширений внутрь отливки, обеспечивая её равенность в направлении, либо делая уширение в направлении установки питающего элемента ЛПС. При этом желательно, чтобы внутренняя полость модели отливки сообщалась с внешней поверхностью, как минимум, в двух местах. Для этого в стенке отливки необходимо выполнить технологическое отверстие. Схема выполнения такого технологического отверстия представлена на рис. 2.35, где на рис. 2.35, а представлено изображение сечения модели отливки без отверстия, а на рис.

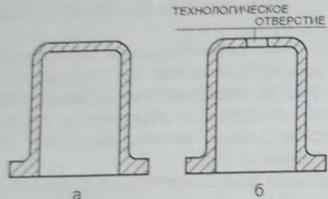


Рис. 2.35. Схема нерекомендуемого (а) и рекомендуемого (б) исполнения отливки

2.35, б та же модель отливки, но с технологическим отверстием.

Наличие технологического отверстия способствует не только улучшению условий сушки слоёв КО во внутренней полости модели, но и обеспечивает равенство стенок отливки, поскольку через данное отверстие осуществляется соединение противоположных стенок КО. Кроме того, наличие технологического отверстия в стенке отливки обеспечивает достаточно свободное удаление КО из отливки и очистку её внутренней поверхности.

В некоторых случаях возникает необходимость выполнения в отливке глубокой протяжённой полости щелевого типа. Поскольку выполнить такие полости телом КО не представляется возможным, то полости данного типа в отливках выполняют с помощью керамических стержней.

В качестве примера рассмотрим процесс выполнения внутренней полости щелевого типа в отливке, разрез которой схематично, представлен на рис. 2.36, а.

При сборке пресс-формы (см. рис. 2.36, в) керамический стержень 3 устанавливается в рабочую полость 2 пресс-формы 1. Во избежание деформации стержня и его поломки при запрессовке модельного состава в пресс-форму в рабочей полости пресс-формы установлены постоянные жеребейки 4 в виде шипов.

После сборки пресс-формы проводят запрессовку модельного состава (см. рис. 2.36, г). Наличие жеребеек в пресс-форме приводит к тому, что после извлечения модели из пресс-формы в месте нахождения жеребеек в стенках модели остаются отверстия, достигающие поверхности керамического стержня. Поэтому эти отверстия 6 (см. рис. 2.36, д), шпательют ремонтным модельным составом.

Впоследствии подготовленные модели отливок собирают в модельный блок,носят на его поверхность огнеупорное покрытие и выплавляют из КО модельный состав. В результате выполнения вышеперечисленных технологических операций получают КО 7 (см. рис. 2.36, е), готовую к прокаливанию и заливке металлом.

В некоторых случаях, для фиксации положения стержня в пресс-форме и КО, используют жеребейки в форме усечённого конуса с диаметром меньшего основания конуса, равным толщине стенки модели, на которой установлена жеребейка, но не

менее 3 мм. После извлечения модели из пресс-формы отверстия, оставшиеся в стенках модели от жеребеек, не шпательют, что позволяет заполнить эти отверстия керамическим покрытием, в процессе формирования на модельном блоке КО.

В результате, поскольку отверстия из-под жеребеек заполнены керамическим материалом и являются частью тела КО, то положение керамического стержня в КО, после выплавления из неё модельного состава и заливки расплавом, будет строго фиксировано телом самой КО.

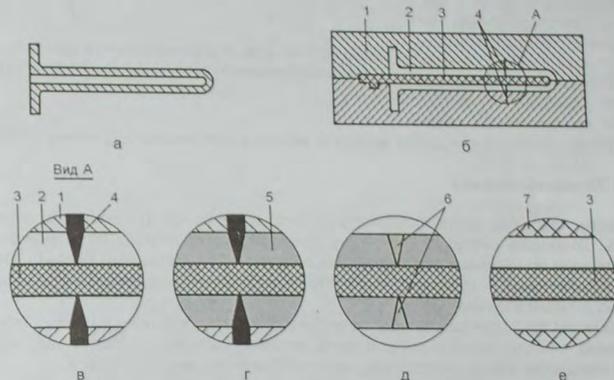


Рис. 2.36. Изготовление отливки с полостью щелевого типа

После выбивки и очистки отливки, перед удалением из её внутренней полости керамического стержня, отверстия, оставшиеся от жеребеек, заваривают и зачищают заподлицо с внешней поверхностью стенки отливки.

Резьбы и зубья. В отливках, получаемых методом литья по выплавляемым моделям, резьбы и зубья изготавливают только в тех случаях, когда элементы резьбы и зубьев имеют крупный шаг и специальный профиль.

Запечки для выхода режущего инструмента. Запечки для выхода режущего инструмента в отливках выполняют с целью упрощения процесса механической обработки данных поверхностей. В ряде случаев наличие запечки оказывает положительное влияние на распределение остаточных напряжений в отливке и понижает величину коробления отливки.

Схема выполнения запечки в отливке представлена на рис. 2.37. Для выполнения запечки рекомендуется назначать $b > h \geq 3$ мм.

Технологические выступы (платики). Для сборки модельных блоков методом пайки на соответствующих поверхностях модели отливки в её пресс-форме следует предусмотреть технологический выступ высотой 3...8 мм – платик, что схематично представлено на рис. 2.38.

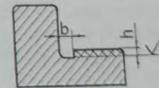


Рис. 2.37. Схема выполнения запечки на отливке

Необходимость выполнения платиков на теле модели отливки в месте пайки обусловлена возможностью отклонения смещения паяемых элементов модельного блока во время его сборки (неточность сборки), а также для предупреждения повреждения поверхности модели отливки в процессе монтажа модельного блока. Как правило, сечение и форма платика соответствуют сечению и форме питателя или шейки прибыли, которые припаивают к данному платику.

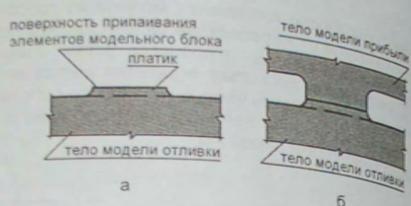


Рис. 2.38. Схема выполнения платика на торце модели отливки (а) и паяного соединения шейки прибыли с платиком (б)

2.2. Точность отливок

К числу наиболее важных параметров изготавливаемой отливки относится её точность. **Точность отливки** – степень приближения её формы, размеров и массы к заданным по чертежу механически обработанной (идеальной) детали. Почти точности отливки – обобщённые характеристики точности размеров и поверхностей либо отливки в целом.

Параметры точности размеров и поверхности отливки включают: класс точности размера, степень коробления элемента отливки, степень точности поверхности отливки, смещение элемента отливки, ряд припуска поверхности отливки.

Параметры точности отливки в целом включают: класс размерной точности, степень коробления, степень точности поверхностей, класс точности массы, а также смещение отливки. Уровень геометрической точности отливок определяется погрешностью их размеров и, при всех прочих равных условиях, зависит от принятых базовых поверхностей на отливке.

Технологические базовые поверхности. При проектировании литой детали назначают базовые поверхности, которые, по возможности, должны быть одними и теми же, что и для изготовления и проверки пресс-форм, и для производства отливок, и для механической обработки этих отливок. При этом базовые поверхности должны быть образованы минимальным числом элементов пресс-формы.

Допуск на базовый размер будет меньшим в том случае, если по каждой из трёх пространственных координатных осей будет назначена только одна главная базовая поверхность с минимальными размерами. В том случае, когда невозможно получить общую базу для отливки и её механической обработки, с целью уменьшения допуска на базовый размер, расстояние между принятыми базами следует брать минимальным. При этом желательно, чтобы принятые базовые поверхности являлись сторонами одной стенки и, как лучший вариант, находились в одной плоскости. Для того чтобы допуски на размеры были наименьшими, базовую поверхность следует выбирать в центре литой детали или помещать базовую поверхность в той части детали, где допуски на размеры, по каким-либо соображениям, должны быть минимальными.

В некоторых случаях конструкция детали может быть такова, что в ней отсутствуют поверхности, удовлетворяющие вышеприведённым условиям выбора базовой поверхности. В этом случае в детали следует выполнить технологические приливы и их поверхности принять за базовые.

Припуск на механическую обработку. Припуск на механическую обработку – это толщина слоя металла, удаляемая с поверхности отливки при её механической обработке, с целью обеспечения заданных размеров, формы, расположения, волнистости и шероховатости поверхности литой детали.

Припуски делят на литейные и геометрические. Литейный припуск – припуск, необходимый для обеспечения заданных требований по качеству поверхности детали (шероховатости, волнистости, бездефектности). Величину литейного припуска на деталь назначают исходя из соображений получения детали без литейных дефектов (усадочных раковин, рыхлот, пористости, трещин, спаев, засора и т.п.). В число таких припусков также входит невыполнение сквозных и глухих отверстий, конусное утолщение стенок, останки платиков, приливок и т.п.

Геометрический припуск на отливке назначают с целью обеспечения заданных размеров, формы и расположения, шероховатости поверхности детали.

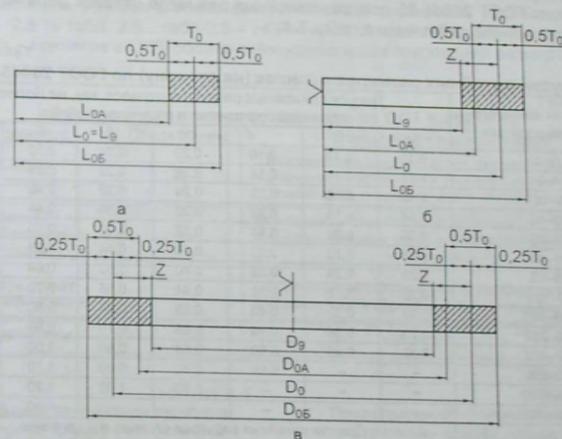


Рис. 2.39. Графическое изображение припусков на механическую обработку и обозначения их величин на чертеже детали.

L_0, D_0 – номинальный размер детали; L_{0A}, D_{0A} – наименьший размер отливки; L_{0B}, D_{0B} – наибольший размер отливки; T_0 – допуск отливки; Z – припуск на механическую обработку (средний)

Правила графического изображения припусков на механическую обработку и обозначения их величин на чертеже детали представлены на рис. 2.39.

Согласно ГОСТ 26645-85 взаимосвязь между номинальным размером до необработываемой поверхности детали, номинальным и предельными размерами и допуском отливки должны соответствовать схеме, представленной на рис. 2.39 а.

Взаимосвязь между номинальным размером до обрабатываемой поверхности детали, припуском на механическую обработку на сторону и допуском на отливку должна соответствовать схемам, представленным на рис. 2.39 б (для случая обработки каждой поверхности отливки от своей базы) и рис. 2.39 в (для случая обра-

ки отливок типа тел вращения или противоположных поверхностей симметричных отливок от общей базы).

Под номинальным размером, при установлении припусков на механическую обработку, следует понимать номинальное расстояние между обработанной поверхностью и базой её механической обработки, а при обработке поверхностей вращения – их номинальный диаметр.

У наклонных, конических и фасонных поверхностей, заданных координатами от одной базы (кроме поверхностей, наклон которых вызван уклонами в пресс-форме), за номинальный размер при назначении допусков и припусков следует принимать наибольший из размеров.

Классы точности размеров и масс отливок, ряды припусков на механическую обработку, основные и дополнительные припуски на механическую обработку, дополнительный припуск, компенсирующий отклонения расположения элементов отливки и т.п., регламентированы ГОСТ 26645-85.

Согласно ГОСТ 26645-85 допуски линейных размеров отливок должны соответствовать значениям, указанным в табл. 2.4.

Таблица 2.4
Допуски линейных размеров отливок (на сторону) по ГОСТ 26645-85

Интервалы номинальных размеров, мм	Допуски линейных размеров отливок, мм, не более, для классов точности размеров отливок						
	3т	3	4	5т	5	6	7т
До 4	0,10	0,12	0,16	0,20	0,24	0,32	0,40
4-6	0,11	0,14	0,18	0,22	0,28	0,36	0,44
6-10	0,12	0,16	0,20	0,24	0,32	0,40	0,50
10-16	0,14	0,18	0,22	0,28	0,36	0,44	0,56
16-25	0,16	0,20	0,24	0,32	0,40	0,50	0,64
25-40	0,18	0,22	0,28	0,36	0,44	0,56	0,70
40-63	0,20	0,24	0,32	0,40	0,50	0,64	0,80
63-100	0,22	0,28	0,36	0,44	0,56	0,70	0,90
100-160	0,24	0,32	0,40	0,50	0,64	0,80	1,00
160-250	0,28	0,36	0,44	0,56	0,70	0,90	1,10
250-400	0,32	0,40	0,50	0,64	0,80	1,00	1,20
400-630	-	-	0,56	0,70	0,90	1,10	1,40
630-1000	-	-	-	0,80	1,00	1,20	1,60
1000-1600	-	-	-	-	1,40	1,80	-

Интервалы номинальных размеров, мм	Допуски линейных размеров отливок, мм, не более, для классов точности размеров отливок						
	7	8	9т	9	10	11т	11
До 4	0,50	0,64	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0
4-6	0,56	0,70	0,9	1,1	1,4	1,8	2,2
6-10	0,64	0,80	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4
10-16	0,70	0,90	1,1	1,4	1,8	2,2	2,8
16-25	0,80	1,00	1,2	1,6	2,0	2,4	3,2
25-40	0,90	1,10	1,4	1,8	2,2	2,8	3,6
40-63	1,00	1,20	1,6	2,0	2,4	3,2	4,0
63-100	1,10	1,40	1,8	2,2	2,8	3,6	4,4
100-160	1,20	1,60	2,0	2,4	3,2	4,0	5,0
160-250	1,40	1,80	2,2	2,8	3,6	4,4	5,6
250-400	1,60	2,00	2,4	3,2	4,0	5,0	6,4
400-630	1,80	2,20	2,8	3,6	4,4	5,6	7,0
630-1000	2,00	2,40	3,2	4,0	5,0	6,4	8,0
1000-1600	2,20	2,80	3,6	4,4	5,6	7,0	9,0

При этом класс размерной точности отливок, в зависимости от их размеров и зернистости огнеупорных материалов, используемых для изготовления КО, изменяется от 3-го до 11-го.

В частности, отливки из цветных лёгких сплавов, не подвергающиеся термообработке, должны соответствовать классу точности от 3-го до 11-го. Отливки из чёрных и цветных тугоплавких сплавов, не подвергающиеся термообработке, а также отливки из цветных лёгких сплавов, подвергающиеся термообработке, должны соответствовать классу точности от 3-го до 10-го. Отливки из чугуна и цветных тугоплавких сплавов, подвергающиеся термообработке, должны соответствовать 4-му...11-му классу размерной точности. Отливки из стали, подлежащие термообработке, должны соответствовать классу размерной точности от 5т до 11-го.

На предприятиях, производящих литые детали особо ответственного (специального) назначения, размерную точность отливок определяет отраслевой стандарт (ОСТ). Например, согласно ОСТ 1.41154-86, обозначения и величина допусков линейных размеров отливок должны соответствовать значениям, указанным в табл. 2.5...табл. 2.8 (в табл. 2.6...табл. 2.8 - НГР - наибольший габаритный размер литой детали, Лт - принятое в ОСТ обозначение предельных отклонений размеров).

Таблица 2.5
Обозначения в классах точности по ОСТ 1.41154-86

Вид размера	Обозначение	Определение вида размеров
Размеры необрабатываемых длин	Д	Все линейные размеры (длины, диаметры и т.п.), за исключением толщин тел и размеров между необрабатываемыми поверхностями и обрабатываемыми
Размеры необрабатываемых толщин	Т	Все толщины стенок, ребер, фланцев и т.п. (входящие в понятие толщины тела), не подвергающиеся механической обработке
Размеры между необрабатываемыми и обрабатываемыми поверхностями	М	Все линейные размеры между необрабатываемыми поверхностями и обрабатываемыми (включая толщины тел), а также радиусы ушек и бобышек с просверленными отверстиями

Таблица 2.6
Предельные отклонения размеров по второму классу точности Лт2

НГР, мм	Предельные отклонения размеров, мм		
	ДЛт2	ТЛт2	МЛт2
До 16	±0,07	±0,05	±0,13
От 16 до 25	±0,08	±0,06	±0,15
25 - 40	±0,10	±0,06	±0,20
40 - 60	±0,12	±0,10	±0,20
60 - 100	±0,15	±0,12	±0,25
100 - 160	±0,20	±0,15	±0,30
160 - 250	±0,30	±0,20	±0,40
250 - 400	±0,40	±0,30	±0,50

Таблица 2.7
Предельные отклонения размеров по третьему классу точности Лт3

НГР, мм	Предельные отклонения размеров, мм		
	ДЛт3	ТЛт3	МЛт3
До 60	±0,2	±0,2	±0,3
От 60 до 100	±0,3	±0,3	±0,4
100 - 160	±0,4	±0,3	±0,5
160 - 250	±0,5	±0,4	±0,6
250 - 400	±0,6	±0,4	±0,7
400 - 630	±0,8	±0,5	±1,0
630 - 1000	±0,9	±0,6	±1,2
1000 - 1250	±1,1	±0,7	±1,3

Таблица 2.8

Предельные отклонения размеров по четвертому классу точности Лт4

НПР, мм	Предельные отклонения размеров, мм		
	ДЛт4	ТЛт4	МЛт4
До 60	±0,4	±0,4	±0,5
От 60 до 100	±0,5	±0,5	±0,5
100 – 160	±0,5	±0,5	±0,6
160 – 250	±0,6	±0,6	±0,7
250 – 400	±0,8	±0,7	±1,0
400 – 630	±1,0	±0,8	±1,5
630 – 1000	±1,2	±0,9	±1,8
1000 – 1250	±1,5	±1,0	±2,0

Погрешности точности отливок. При изготовлении партии отливок возникают случайные и систематические погрешности точности. Случайные погрешности вызваны случайными факторами, сопутствующими любой стадии процесса изготовления отливок.

К числу таких факторов относятся термовременные параметры изготовления и хранения моделей (температура модельного состава при запрессовке в пресс-форму, длительность выдержки модели в пресс-форме, температура пресс-формы в момент запрессовки модельного состава, температура воздуха в модельном отделении и др.), тип и качество материалов, используемых для изготовления

КО, технология приготовления огнеупорной суспензии и длительность её использования, параметры нанесения и сушки огнеупорного покрытия, способ подготовки КО к заливке, режим и способ прокаливанию КО, параметры плавки металла, качество шихтовых материалов, условия охлаждения отливки и т.п.

К числу случайных факторов, например, относится некачественная подготовка поверхностей разъёма пресс-формы, состоящая в неполном удалении с этих поверхностей остатков модельного состава. В результате этого при сборке пресс-формы происходит неплотное прилегание отдельных частей пресс-формы и, как результат, увеличение отдельных размеров модели и, соответственно, отливки.

Систематические погрешности могут носить как постоянный, так и переменный характер.

Систематические погрешности постоянного характера имеют одинаковые значения величин для всей партии отливок и вызваны ошибками при конструировании и изготовлении модельной оснастки (пресс-формы для изготовления моделей, керамических, графитовых или водорастворимых стержней), в процессе проектирования отливки неправильным назначением величин линейной усадки водорастворимого или керамического стержня, модельного состава, сплава отливки и т.п.

Систематические погрешности переменного характера имеют возрастающие значения величин от предыдущей к последующей партии отливок и вызваны, например, износом модельной оснастки. При этом погрешность закономерно изменяется по ходу технологического процесса.

Точность размеров отливок, в основном, зависит от частоты повторения случайных погрешностей и их величины, а также величины систематических погрешностей. Совокупность случайных и систематических погрешностей предопределяет величину так называемых полей рассеяния размеров. Поэтому о точности размеров отливок судят по результатам определения полных полей рассеяния размеров и установления классов точности, применяемых систем и допусков, в поля которых вкладываются поля рассеяния реальных размеров отливок (см. гл. 16).

Обозначение точности отливок. Согласно ГОСТ 26645-85 в технических требованиях чертежа отливки или детали с нанесёнными размерами отливки должны быть указаны нормы точности отливки в следующей последовательности: класс размерной точности, степень коробления, степень точности поверхностей, класс точности массы и допуск смещения отливки.

Например, для отливки 8-го класса размерной точности, 4-й степени коробления, 4-й степени точности поверхностей, 7-го класса точности массы с допуском смещения 0,2 мм, записывают следующее условное обозначение точности отливки:

Точность отливки 8-4-4-7 См 0,2 ГОСТ 26645-85

Ненормируемые показатели точности отливок в обозначении их точности заменяют нулями, а обозначение смещения опускают. Например:

Точность отливки 8-0-0-7 ГОСТ 26645-85

В технических требованиях чертежей литой детали, согласно ГОСТ 26645-85, допускается указывать сокращённую номенклатуру норм точности отливки. При этом указание классов размерной точности и точности массы отливки является обязательным. Например:

Точность отливки 8-0-0-7 ГОСТ 26645-85

Шероховатость поверхности отливок. Чистота поверхности отливок определяется микрогеометрией поверхности, то есть величиной её микронеровностей.

Шероховатость поверхности отливок оценивают по ГОСТ 2789-73, а обозначения шероховатости поверхностей и правила их нанесения на чертёж изделия установлены ГОСТ 2.309-73.

ГОСТ 2789-73 устанавливает перечень параметров и типов направлений неровностей, которые должны применяться при установлении требований и контроле шероховатости поверхностей, числовые значения параметров и общие указания по установлению требований к шероховатости поверхностей.

Стандарт не распространяется на шероховатость поверхностей, характеристики которых делают невозможным нормирование и контроль шероховатости имеющимися методами, а также на дефекты поверхности, являющиеся следствием дефектов материала отливки (раковины, поры, трещины, питтинговая коррозия и т.п.) или случайных повреждений (царапины, вмятины и т.д.).

Требования к шероховатости поверхности устанавливают исходя из функционального назначения поверхности, с целью обеспечения заданного качества изделий. Если в этом нет необходимости, то требования к шероховатости поверхности не устанавливаются и шероховатость этой поверхности не контролируют. При этом требования к шероховатости поверхности не включают требований к дефектам поверхности, поэтому при контроле шероховатости поверхности влияние дефектов поверхности должно быть исключено.

Стандартом допускается устанавливать требования к шероховатости для отдельных участков одной поверхности, которые могут быть различными.

По сути, шероховатость поверхности – это совокупность её микронеровностей. Для количественной оценки которой стандартом установлено шесть параметров (Rz – среднее арифметическое отклонение профиля, Rx – высота неровностей профиля по десяти точкам, $Rmax$ – наибольшая высота профиля, Sm – средний шаг неровностей, S – средний шаг местных выступов профиля, tp – относительная опорная длина профиля, где p – значение уровня сечения профиля), среди которых Rz , Rx – наиболее применяемые, из них Rx – предпочтительнее.

Параметры шероховатости (один или несколько) выбирают из номенклатуры.

приведенной в табл. 2.9, с использованием схемы обозначений элементов шероховатости поверхности, представленной на рис. 2.40.

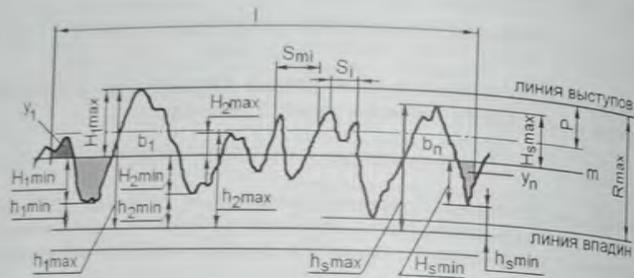


Рис. 2.40. Схема обозначений элементов шероховатости поверхности

Окончание табл. 2.9

1	2
Опорная длина профиля (l_p)	Сумма длин отрезков в пределах базовой длины, отсекаемых на заданном уровне в материале профиля линией, эквидистантной средней линии
Относительная опорная длина профиля (l_p)	Отношение опорной длины профиля к базовой длине $l_p = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{l}$
Уровень сечения профиля (P)	Расстояние между линией выступов профиля и линией, пересекающей профиль эквидистантно линии выступов профиля
Средний шаг неровностей профиля (S_m)	Среднее значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины
Средний шаг местных выступов профиля (S)	Среднее значение шага местных выступов профиля в пределах базовой длины
Высота неровностей профиля по десяти точкам (R_z)	Сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины $R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{pmi} + \sum_{i=1}^5 y_{vmi} }{5}$ где y_{pmi} – высота i -го наибольшего выступа профиля, y_{vmi} – глубина i -й наибольшей впадины профиля
Наибольшая высота профиля (R_{max})	Расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины
Отклонение профиля (y)	Расстояние между любой точкой профиля и средней линией
Среднее арифметическое отклонение профиля (R_a)	Среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины: $R_a = \frac{1}{l} \int_0^l y dx \quad \text{или} \quad R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i $ где l – базовая длина; N – число выбранных точек профиля на базовой длине

Термины и определения шероховатости поверхности

Таблица 2.9

Термин (обозначение)	Определение
1	2
Номинальная поверхность	Поверхность, заданная в технической документации без учета допускаемых отклонений
Базовая линия (поверхность)	Линия (поверхность) заданной геометрической формы, определенным образом проведенная относительно профиля (поверхности) и служащая для оценки геометрических параметров поверхности
Нормальное сечение	Сечение, перпендикулярное базовой поверхности
Базовая длина (l)	Длина базовой линии, используемая для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности
Средняя линия профиля (M_2)	Базовая линия, имеющая форму номинального профиля и проведенная так, что в пределах базовой длины среднее квадратическое отклонение профиля до этой линии минимально
Выступ профиля	Часть реального профиля, соединяющая две соседние точки пересечения его со средней линией профиля, направленная в тело
Впадина профиля	Часть реального профиля, соединяющая две соседние точки пересечения его со средней линией, направленная в тело
Линия выступов профиля	Линия эквидистантная средней линии, проходящая через высшую точку профиля в пределах базовой длины
Линия впадин профиля	Линия, эквидистантная средней линии, проходящая через низшую точку профиля в пределах базовой длины
Неровность профиля	Выступ профиля и сопряженная с ним впадина профиля
Направление неровностей поверхности	Условный рисунок, образованный нормальными проекциями экстремальных точек неровностей поверхности на среднюю поверхность
Шероховатость поверхности	Совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенная с помощью базовой длины
Шаг неровностей профиля	Отрезок средней линии профиля, ограничивающий неровность профиля
Шаг местных выступов профиля	Длина отрезка средней линии между проекциями на нее двух наивысших точек соседних местных выступов профиля

Примечание. Относительная опорная длина профиля l_p : 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90%. Числовые значения уровня сечения профиля P выбирают из ряда 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90% от R_{max} . Числовые значения базовой длины l выбирают из ряда: 0,01; 0,03; 0,08; 0,25; 0,80; 2,5; 8; 25 мм. Направление исследуемого сечения не оговаривается, если требования технической документации относятся к направлению сечения на поверхности, которое соответствует наибольшим значениям высотных параметров

Соотношение значений параметров R_a , R_z , R_{max} и базовой длины приведены в табл. 2.10 и табл. 2.11.

Таблица 2.10

Соотношение значений параметра Rz и базовой длины

Rz , мкм	l , мм
До 0,025	0,08
Св. 0,025 до 0,4	0,25
Св. 0,4 до 3,2	0,8
Св. 3,2 до 12,5	2,5
Св. 12,5 до 100	8,0

Соотношение значений параметров Rz , R_{max} и базовой длины

$Rz = R_{max}$, мкм	l , мм
До 0,10	0,08
Св. 0,10 до 1,6	0,25
Св. 1,6 до 12,5	0,8
Св. 12,5 до 50	2,5
Св. 50 до 400	8,0

Таблица 2.11

Как правило, отливки, получаемые методом литья по выплавляемым моделям, имеют шероховатость поверхности от $Rz=40$ мкм до $Ra=1,25$ мкм.

Согласно ГОСТ 2.309-73 установлено 14 классов шероховатости поверхностей, обозначения которых приведены в табл. 2.12. Согласно ГОСТ 2789-73 шероховатость поверхности отливок, полученных методом литья по выплавляемым моделям, должна соответствовать 4-му...6-му классу.

Классы шероховатости поверхностей

Таблица 2.12

Классы шероховатости поверхности	Величина шероховатости, мкм		Базовая длина (l), мм
	Ra	Rz	
1	—	320–160	8,0
2	—	160–80	
3	—	80–40	
4	—	40–20	
5	—	20–10	2,5
6	2,5–1,25	—	
7	1,25–0,63	—	
8	0,63–0,32	—	0,8
9	0,32–0,16	—	
10	0,16–0,08	—	0,25
11	0,08–0,04	—	
12	0,04–0,02	—	
13	—	0,10–0,05	
14	—	0,05–0,025	0,08

представляет прямую линию. Технические параметры профилометра мод. 283 приведены в табл. 2.13.

Технические параметры профилометра мод. 283

Таблица 2.13

Параметр	Значения
Диапазон измерений, мкм	0,02–10
Длина трассы ощупывания при измерении, мм	1,5 и 4,8
Скорость трассирования датчика, м/с	0,25 и 0,8
Значения отсечки шага, мм	0,25 и 0,8
Радиус кривизны вершины щупа, мкм	10
Минимальный диаметр проверяемого отверстия, мм:	
- на глубине до 20 мм	6
- на глубине до 130 мм	16
Характеристики основной приведенной погрешности, %:	
- предел допускаемой систематической составляющей	10
- предел допускаемого среднего квадратического отклонения случайной составляющей	2
Масса, кг	23

В случае, когда отливка выполнена из сплава с низкой твердостью, а также в случае определения шероховатости рабочих поверхностей пресс-форм, моделей, КО, гипсовой формы, водорастворимых, графитовых или керамических стержней, следует использовать, по понятным причинам, бесконтактный профилометр. Бесконтактный профилометр, например, является двойной микроскоп МИС-11 конструкции В.П. Линника или прибор ПСС-2.

Для большинства выпускаемых отливок общемашиностроительного назначения шероховатость поверхности оценивают визуально, сравнивая её с качеством поверхности утвержденного эталона.

Шероховатость поверхности отливок, полученных методом литья по выплавляемым моделям, зависит от достаточного большого числа факторов, к числу которых относятся: шероховатость рабочих поверхностей пресс-формы, шероховатость поверхности модели, термовременные параметры изготовления модели, дисперсность, гранулометрический состав и форма зёрен пылевидного огнеупорного материала, используемого для приготовления огнеупорной суспензии лицевого слоя КО, количество и свойства связующего вещества КО, технология изготовления, хранения и подготовки КО к заливке, химическая устойчивость материала рабочей поверхности формы по отношению к расплаву отливки, длительность контакта расплава с формой, условия охлаждения отливки в форме, технология обработки отливки на финишных операциях и др.

У отливок из сплавов, выполненных на основе химически активных элементов (например, титана), помимо всего прочего, качество поверхности зависит и от природы используемого наполнителя, применяемого в огнеупорной суспензии для лицевого слоя КО.

В качестве примера на рис. 2.41 представлена зависимость шероховатости поверхности отливок из сплава ВТ1Л от величины зерна и природы материала наполнителя огнеупорной суспензии, использованной для выполнения лицевого слоя КО.

Для отливок из коррозионностойких, хромоникелевых сталей, полученных в восстановительной среде, в КО, лицевой слой которых выполнен из огнеупорной суспензии, приготовленной на основе гидролизованного раствора этилсиликата ($M=0,23...0,27$, содержание условного SiO_2 в связующем – 18...20%) с эфиром

Шероховатость поверхности отливок измеряют с помощью профилографов (прибор для измерения неровности поверхности и представления результатов в виде кривой линии – профилограммы) и профилометров (прибор для измерения неровностей поверхности с отсчитыванием результатов измерения на шкале в виде числовых значений одного из параметров, используемых для оценки этих неровностей, шероховатости поверхности, характеризующей волнистость и шероховатость поверхности) различных конструкций и пределов измерений. В частности, шероховатость поверхности отливок определяют на контактном профилографе-профилометре мод. 201 завода «Калибр» (Россия), профилографе-профилометре Абрис-ПМ7.4 (Россия) и др. Пределы измерений контактных профилографов, например, производимых заводом «Калибр» – от 100 мкм до 0,02 мкм.

Для измерения шероховатости поверхности отливок также используют контактные профилометры, например, мод. ПМА-50Д, мод. 283, мод. 296 и т.п. В частности профилометр мод. 283 с унифицированной электронной системой типа А, группы II по ГОСТ 19300-73, предназначен для измерения шероховатости поверхности деталей с твердостью не менее НВ 10, сечение которых в плоскости измерения

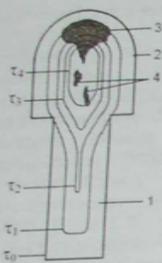


Рис. 3.22. Положение фронта кристаллизации в отливке в различные периоды времени затвердевания металла в форме

термической узел отливки, на котором установлен при-
быль. Сечение шейки прибыли может быть несколько
больше указанного диаметра вписанной окружности, что
качестве такого термического узла принята окружность, если в
стенка отливки. Длина шейки прибыли, в основном, протяжённая
делается шириной реза, который оставляет режущий инст-
руммент, используемый для отделения отливки от прибыли.
Как правило, длина шейки прибыли находится в пределах
от 3 до 15 мм.

Используемые в литье по выплавляемым моделям
прибыли классифицируют:

- по месту (уровню) их установки на отливке (верхние,
нижние, боковые);

- по конфигурационному признаку (шаровые, полушаро-
вые, цилиндрические, конические и пр., а также сегмент-
ные и кольцевые);

- по способу повышения эффективности их работы (ат-
мосферного давления, газового давления, утепленные,
обогреваемые и т.п.).

Кроме того, прибыли могут быть открытыми или закры-
тыми, что схематично представлено на рис. 3.23.

При всех прочих равных условиях, прибыли открытого типа менее эффективны,
чем прибыли закрытого типа. Наличие открытой поверхности расплава в прибыли
открытого типа приводит к весьма интенсивной теплоотдаче с этой поверхности

в атмосферу. В связи с этим, по сравнению с прибылями закрытого типа, при всех прочих равных условиях, прибыли открытого типа имеют объём в 1,5...2,5 раза больший. С целью повышения эффективности работы прибылей открытого типа рекомендуется, непосредственно после окончания заливки КО или в процессе заполнения открытой прибыли расплавом, в её полость ввести предварительно прокалённую при 500...950°C пластину (~20x20x60 мм), вырезанную из пеношамотного кирпича марки ШЛ-1,3 или ШЛ-0,9. После заполнения открытой прибыли расплавом пластина будет закрывать часть свободной поверхности зеркала расплава в прибыли, что улучшит условия питания отливки.

Помимо пластины из пеношамотного кирпича, можно использовать лист хризотилового асбеста, уложенный на торец прибыли непосредственно по окончании заливки формы. Кроме того, уменьшить теплоотдачу со свободной поверхности расплава в прибыли можно путём установки, ещё до начала прокаливания КО, керамической крышки или пеношамотной пластины, как, например, это представлено на рис. 3.24.

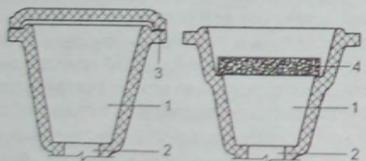


Рис. 3.24. Схемы прибылей открытого типа: 1 – прибыль; 2 – шейка прибыли; 3 – крышка керамическая; 4 – пластина пеношамотная

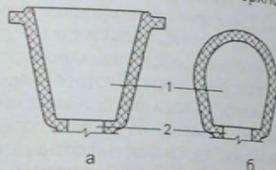


Рис. 3.23. Схема прибыли открытого (а) и закрытого (б) типа: 1 – прибыль; 2 – шейка прибыли

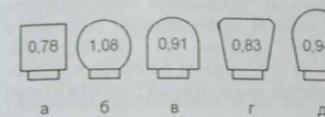


Рис. 3.25. Формы закрытых прибылей.

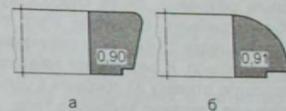
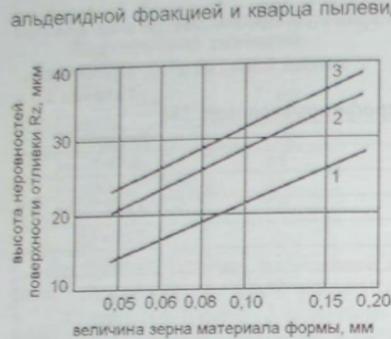


Рис. 3.26. Формы сечений кольцевых прибылей с трапециевидным (а) и секторным (б) профилями сечения

Из данных, представленных на рис. 3.25 следует, что наименьший модуль (наименьшее время затвердевания и, соответственно, наименьшую эффективность) имеет прибыль в форме куба (см. рис. 3.25,а). Наибольший модуль (наибольшее время затвердевания и, соответственно, наибольшую эффективность) имеет шаровая (сферическая) прибыль (см. рис. 3.25,б).

В цехах литья по выплавляемым моделям, в настоящее время наибольшее распространение получили прибыли конической (см. рис. 3.25,г) и полушаровой конической (см. рис. 3.25,д) формы. Сравнение величины модуля охлаждения прибылей конической формы показывает, что, с точки зрения эффективности работы, прибыль конической формы значительно уступает прибылям с формами (за исключением прибыли в форме куба), представленными на рис. 3.25.

Сечения прибылей кольцевого типа, с формой поперечного сечения трапециевидного и секторного типов, представлены на рис. 3.26, где числа на изображении сечения указывают величину модулей охлаждения прибылей при их одинаковом объёме. Близость величин модулей охлаждения рассматриваемых прибылей свидетельствует, что обе прибыли, с точки зрения длительности затвердевания металла в прибыли, практически равноценны.



апельдегидной фракцией и кварца пылевидного, прошедшего помол в шаровой мельнице, зависимость между шероховатостью поверхности отливки (Rz , мкм) и средним диаметром зерна кварца пылевидного (d , мкм) можно рассчитать по эмпирическому уравнению, полученному автором (для d от 10 до 120 мкм):

$$Rz = d^{0.66} \quad (2.17)$$

Используя уравнение (2.17) несложно рассчитать, что, в случае использования кварца пылевидного со средним диаметром его частиц, например, 0,040 мм (40 мкм), ожидаемая величина шероховатости стальной отливки из коррозионностойкой стали составит:

$$Rz = 40^{0.66} = 11,4 \text{ мкм,}$$

что соответствует 5-му классу шероховатости поверхности.

2.3. Пресс-формы

В промышленных условиях производства отливок методом литья по выплавляемым моделям пресс-форма – основной “инструмент” для получения модели отливки. Поэтому уровень качества изготовленной пресс-формы во многом предопределяет качество получаемых отливок.

В связи с этим к пресс-формам предъявляют следующие требования: пресс-форма должна обеспечить получение качественных моделей (без поверхностных дефектов, с заданной точностью и чистой поверхностью) за минимально короткое время. Кроме того, пресс-форма должна быть простой в изготовлении, удобной в эксплуатации и обслуживании, надёжной и долговечной.

Рассматривая все многообразие используемых в литье по выплавляемым моделям пресс-форм, Я.И. Шкленник классифицирует пресс-формы по ряду признаков, которые приведены в табл. 2.14.

Таблица 2.14

Классификация пресс-форм и область их применения

Признак	Группа пресс-форм	Область применения
1	2	3
Точность	С высокой точностью размеров (до 7 класса по ГОСТ 1010)	Турбинные лопатки, роторные колёса и другие детали высокой точности
	С точными размерами (до 9 класса по ГОСТ 1010)	Детали общего машиностроения и инструмент
	С чётким воспроизведением контуров	Художественное литьё
Сложность	Простые, средней сложности, сложные	В зависимости от сложности отливок, степени механизации, числа гнезд в пресс-форме

Окончание табл. 2.14		
1	2	3
Материал пресс-форм	Неметаллические (пластмассовые, гипсовые, цементные, резиновые, деревянные)	Единичное и мелкосерийное производство
	Металлические (свинцово-оловянные, цинковые, алюминиевые, стальные)	Серийное и массовое производство
Способ изготовления пресс-форм	Комбинированные (в основном, с металлическими вставками)	Мелкосерийное и серийное производство
	Изготовление по мастер-модели (литьём, напылением, гальванопластикой)	При обработке процесса литья, специальные случаи, художественное литьё, мелкосерийное производство
	Механически обработанные из алюминиевых сплавов и сталей	Массовое и серийное производство деталей машин
Способ заполнения модельным составом	Комбинированные	Серийное производство деталей машин
	Свободная заливка жидким модельным составом	Производство элементов литниковой системы и полых моделей
Способ охлаждения пресс-форм	Заливка под давлением	Изготовление полых и сплошных моделей
	Заполнение под давлением пастообразным модельным составом	Изготовление моделей и модельных звеньев
Механизация	В окружающей среде (на воздухе), в воде	Единичное и серийное производство
	Водой, протекающей по каналам, выполненным в стенках пресс-форм	Массовое производство
Число одновременно получаемых моделей в пресс-форме	Ручные	Единичное и серийное производство
	Механизированные	Серийное и массовое производство
	Автоматизированные	Массовое производство
Положение плоскости разёма	Одноместные (одногнездные)	Единичное и серийное производство, крупногабаритные и сложные модели
	Многоместные (многогнездные)	Массовое производство
Положение плоскости разёма	С вертикальным разёмом	Пресс-формы для автоматов модельных звеньев
	С горизонтальным разёмом	Ручные и механизированные пресс-формы

Процесс изготовления пресс-формы начинается с её проектирования. Проектирование пресс-формы для изготовления моделей отливки осуществляют на основании чертежа отливки и соответствующего технического задания. На чертеже отливки указывают: плоскость разёма пресс-формы, припуски на механическую обработку, базовые поверхности, место (места) подвода металла в отливку, размеры питающих элементов литниковой системы (например, питателей), технические требования, предъявляемые к отливке. В случае проектирования многогнездной (многоместной) пресс-формы, вычерчивают звено моделей.

В техническом задании, прилагаемом к чертежу отливки, указывают исходные данные для проектирования пресс-формы: усадку модельного состава и, если для выполнения модели предусмотрен стержень, стержневой массы, линейную усадку сплава отливки, КТЛР материала КО и т.п.

Как правило, каждая пресс-форма является оригинальной конструкцией. Тем не менее для проектирования автоматизированных пресс-форм, работающих на автоматах по производству модельных звеньев, используют ГОСТ 19947...ГОСТ 19999.

До начала проектирования какой-либо пресс-формы выбирают её материал. Для этого можно, например, использовать информацию табл. 2.14, а также информацию табл. 2.15.

Характеристика материалов, используемых для изготовления пресс-форм

Таблица 2.15

Материал пресс-формы	Способ изготовления	Достоинства материала пресс-формы	Недостатки материала пресс-формы
1	2	3	4
Сталь, алюминиевый сплав	Механическая обработка	Изготовление моделей практически, любых габаритных размеров. Высокая точность, чистота формообразующих поверхностей, надёжность в работе, долговечность. Возможность автоматизации операций сборки-разборки, смазки и удаления моделей в условиях массового производства литья. Возможно выполнение внутреннего принудительного охлаждения. Обеспечивает высокую производительность производства моделей и модельных звеньев.	Сложность, длительность и дороговизна изготовления.
Легкоплавкие цветные сплавы (сплав Вуда, Розе, ЦАМ 4-1 и т.п.)	Литьё (свободная заливка)	Относительная быстрота, простота и дешевизна изготовления. Удовлетворительная чистота поверхности. Надёжность в работе, долговечность. Обеспечивает достаточно высокую производительность изготовления моделей.	Невысокая точность размеров. Применима для моделей простой конфигурации. Ручная сборка-разборка, удаление моделей. Отсутствие внутреннего принудительного охлаждения.
Металл + пластмасса (эпоксидная смола) с металлическим наполнителем	Гальванопластика, металлизация или напыление металла + литьё пластмассы с металлическим наполнителем	Относительная быстрота, простота и дешевизна изготовления. Высокая размерная точность и чистота поверхности. Надёжность в работе, долговечность.	Используется для получения моделей простой конфигурации. Ручная сборка-разборка, удаление моделей. Отсутствие внутреннего принудительного охлаждения. Невысокая производительность изготовления моделей.
Пластмассовые (на основе эпоксидной смолы)	Литьё (свободная заливка, холодное отверждение)	Относительная быстрота, простота и дешевизна изготовления. Высокая чистота поверхности. Дешевизна изготовления	Используется для получения моделей простой конфигурации. Ручная сборка-разборка, удаление моделей. Отсутствие внутреннего принудительного охлаждения. Невысокая размерная точность. Относительно низкая надёжность и долговечность. Низкая производительность изготовления моделей.

1	2	3	Окончание табл. 2.15 4
Эластичные материалы + гипс	Окунание (холодная полимеризация) + литьё (холодное отверждение)	Относительная быстрота, простота и дешевизна изготовления. Относительно высокая чистота поверхности. Изготовление моделей любой степени сложности.	Используется для получения моделей простой конфигурации. Ручная сборка-разборка, удаление моделей. Отсутствие внутреннего принудительного охлаждения. Крайне низкая размерная точность. Низкая надёжность в работе и долговечность. Крайне низкая производительность изготовления моделей. Преимущественно модели изготавливают путём заливки жидкого модельного состава.
Гипс	Литьё (холодное отверждение) + пропитка эпоксидной смолой	Относительная быстрота, простота и дешевизна изготовления.	Используется для получения моделей простой конфигурации. Ручная сборка-разборка, удаление моделей. Отсутствие внутреннего принудительного охлаждения. Низкая размерная точность и чистота поверхности. Низкая надёжность в работе и низкая долговечность. Крайне низкая производительность изготовления моделей. Преимущественно модели изготавливают путём заливки жидкого модельного состава в пресс-форму.

После выбора материала пресс-формы проводят расчёт размеров её формообразующих (рабочих) полостей.

Размеры формообразующих (рабочих) полостей пресс-форм. Расчёт размеров формообразующих (рабочих) полостей пресс-форм ведут с учётом достаточного большого количества факторов, в число которых входят:

- усадка модельного состава при изготовлении модели;
- усадка металла отливки при её кристаллизации и охлаждении;
- усадка оболочковой формы (керамической, графитовой) в результате её спекания при прокаливании (если форма гипсовая, то учитывают её расширение во время сушки);
- увеличение размеров формы при её нагреве под заливку;
- увеличение размеров формы при её нагреве от залитого в неё расплава и др.

Профиль рабочих полостей пресс-формы рассчитывают, исходя из теоретического профиля детали, в декартовой или полярной системе координат либо графическим путём.

Значительное число факторов, влияющих на размерную точность отливок, не позволяют гарантировать получение отливок с размерами, отвечающими размерам идеальной детали. В связи с этим, при проектировании пресс-форм для особо сложных деталей (например, турбинных лопаток, роторов и т.п.), возникают достаточно большие трудности.

Поскольку размерная точность литых деталей изначально закладывается в размерах рабочих полостей пресс-формы и её конструкции, то в процессе конструирования пресс-формы следует стремиться:

- к простой конструкции пресс-формы;
- к минимальному числу разъёмов в пресс-форме;
- к преимущественному расположению модели в одной из частей пресс-формы;
- к обеспечению свободного удаления воздуха из внутренних полостей пресс-формы при запрессовке в неё модельного состава.

Сложность, а порой и невозможность проведения точных расчётов размеров формообразующих полостей пресс-формы сложнопрофильной модели отливки,

приводит к необходимости пресс-формы с перспективой её последующей доработки (доводки). С этой целью элементы пресс-формы, оформляющие наружные (охватываемые телом пресс-формы) поверхности модели отливки, проектируют уменьшенных размеров. В то же время элементы пресс-формы, оформляющие внутренние (охватываемые телом модели) поверхности модели, оформляют увеличенных размеров. Данный подход проектирования пресс-форм впоследствии, в случае необходимости, позволяет удалять лишние слои металла с этих поверхностей пресс-формы, то есть проводить доводку пресс-формы.

Поскольку, при всех прочих равных условиях, основными причинами отклонений размеров отливок от их номинальных значений являются нестабильность величины усадки сплава и модельного состава, а также расширение КО при прокаливании и затвердевании отливки, то, соответственно, размеры рабочих полостей пресс-формы рассчитывают по формуле:

$$L_{пр} = L_{ном} + \frac{L_{ном} \cdot \sum \alpha}{100} \pm \Delta \pm \Delta', \quad (2.18)$$

где $L_{ном}$ – чертёжный размер детали, мм; Δ – допуск на размер, мм ($+\Delta$ – для внутренних размеров, $-\Delta$ – для наружных размеров); Δ' – допуск на изготовление пресс-формы, мм ($+\Delta'$ – для внутренних размеров, $-\Delta'$ – для наружных размеров); $\sum \alpha$ – относительная суммарная усадка, %:

$$\sum \alpha = \alpha_M \cdot \alpha_{КО} + \alpha_O, \quad (2.19)$$

где α_M – линейная усадка модельного состава (модели) при затвердевании и охлаждении от температуры запрессовки модельного состава в пресс-форму до 20°C, %; $\alpha_{КО}$ – линейное расширение КО при нагреве от 20°C до температуры, при которой она заливается жидким металлом, %; α_O – линейная усадка сплава отливки, %.

Расчёт размеров формообразующих полостей пресс-формы по формуле (2.18) сопряжён с определёнными трудностями, поскольку значения величин α_M , $\alpha_{КО}$ и α_O непостоянны, изменяются в определённых пределах даже в пределах одной отливки и зависят от характера усадки той или иной части и модели, и отливки, а также величины теплового расширения материала КО.

В первом приближении величину свободной усадки модельного состава рассчитывают по формуле:

$$\alpha_M = K_M (0,97 \cdot t_{мод} - 20), \quad (2.20)$$

где K_M – КТЛР модельного состава, °C⁻¹; $t_{мод}$ – температура запрессовки модельного состава в пресс-форму, °C.

Величину свободной усадки металла (отливки) рассчитывают по формуле:

$$\alpha_O = K_{мет} (t_s - 20), \quad (2.21)$$

где $K_{мет}$ – КТЛР сплава отливки в интервале температур от 20°C до t_s , °C⁻¹; t_s – температура солидус металла отливки, °C.

Величина термического расширения КО зависит от достаточно большого количества параметров, в частности от физико-химических свойств используемых для изготовления КО огнеупорных материалов, пористости КО, температуры КО, темпе-

ратуры течения расплава в КО, толщины стенки отливки и КО, способа подвода расплава в КО и т.п.

В первом приближении, при значениях пористости КО до 30%, величину коэффициента линейного расширения КО, изготовленной из огнеупорных материалов, не разлагающихся, не спекающихся, не имеющих полиморфных превращений и не образующих химических соединений между собой в рабочем интервале температур КО, автор рекомендует рассчитывать по формуле (%):

$$\alpha_{КО} = 100 \cdot \sqrt{1 - \frac{P}{100}} \cdot Z \cdot (t_{теч} - t_2) \cdot [k_{КО} \cdot \sqrt{U_{об}} + k_H \cdot \sqrt{U_H} + k_{СВ} \cdot \sqrt{U_{СВ}}], \quad (2.22)$$

$$Z = 1 - \frac{1}{e^A}; \quad A = \frac{R \cdot c_1 \cdot \rho_1^1}{X \cdot c_2 \cdot \rho_2}$$

где $k_{КО}$, k_H , $k_{СВ}$ – коэффициент термического линейного расширения (в интервале температур от 20°C до t_2) обсыпчного материала КО, огнеупорного, пылевидного наполнителя суспензии и связующего вещества соответственно, °C⁻¹; t_2 – начальная температура КО, при которой походит заливка металлом, °C; $t_{теч}$ – средняя температура течения расплава в форме, °C; $U_{об}$, U_H , $U_{СВ}$ – средний объём обсыпчного материала КО, а также огнеупорного пылевидного наполнителя суспензии и связующего вещества, расходуемого на один слой КО, соответственно, м³; R – половина толщины стенки отливки (средняя), м; X – средняя толщина стенки КО, м; c_1 и c_2 – средняя теплоёмкость жидкого металла и КО при t_2 соответственно, Дж/(кг·град); ρ_1^1 и ρ_2 – плотность жидкого металла и КО соответственно, кг/м³; P – кажущаяся пористость КО, %.

Пример 2.1. Рассчитаем величину КТЛР керамической оболочковой формы, изготовленной на основе белого электрокорунда, гидролизованного раствора этилсиликата марки ЭТС-40 и пылевидного материала (наполнителя огнеупорной суспензии) – дистен-силлиманита. Пусть кажущаяся пористость КО составляет $P=22\%$, толщина стенки КО $X=0,01$ м, теплоёмкость $c_2=1950$ Дж/(кг·град), плотность $\rho_2=2350$ кг/м³. Средняя температура течения расплава в форме равна $t_{теч}=1550$ °C, начальная температура КО перед заливкой равна $t_2=950$ °C. Примем среднюю толщину стенки стальной отливки $\delta=0,004$ м или $R=0,002$ м. Для жидкой стали примем: $c_1^1=920$ Дж/(кг·град) и $\rho_1^1=7100$ кг/м³.

Для проведения расчётов по формуле (2.21) воспользуемся справочными данными: для белого электрокорунда $\rho_3=3990$ кг/м³, $k_3=8,8 \cdot 10^{-6}$ °C⁻¹, для дистен-силлиманита $\rho_{дс}=3250$ кг/м³, $k_{дс}=5,5 \cdot 10^{-6}$ °C⁻¹, для аморфной двуокиси кремния $\rho_{SiO_2}=3990$ кг/м³, $k_{SiO_2}=0,6 \cdot 10^{-6}$ °C⁻¹.

Допустим, что для выпуска тонны годных отливок расход основных материалов на 1 слой КО составляет: электрокорунда белого – $M_{ЭК}=130$ кг, дистен-силлиманита $M_{дс}=27$ кг, этилсиликата (марка ЭТС-40) – 16 кг.

Зная количество этилсиликата, рассчитаем массу содержащегося в нём – условного SiO₂. Для этого массу используемого этилсиликата (16 кг) умножим на коэффициент содержания в нём условной двуокиси кремния (0,4). В результате получаем содержание аморфного SiO₂ в КО от связующего вещества – $M_{СВ}=6,4$ кг.

Используя имеющиеся данные, рассчитываем объём используемых материалов:

- электрокорунда белого: $U_{об} = M_{ЭК} / \rho_3 = 130 / 3990 = 0,03258$ м³,
- дистен-силлиманита: $U_H = M_{дс} / \rho_{дс} = 27 / 3250 = 0,008308$ м³.

- аморфной двуокиси кремния, от связующего: $U_{св} = M_{св} / \rho_{SiO_2} = 6,4/2650 = 0,002415 \text{ м}^3$

Подставляя полученные и справочные данные в формулу (2.22) находим, что при указанных параметрах КО и температуре течения расплава в форме коэффициент линейного расширения КО составит $\alpha_{КО} \approx 0,9\%$ или величина её КТЛР ($^{\circ}\text{C}^{-1}$):

$$k_{КО} = \frac{0,01 \cdot \alpha_{КО}}{t_2 - 20} = \frac{0,01 \cdot 0,9}{950 - 20} = 9,68 \cdot 10^{-6}$$

Необходимо отметить, что величина затруднённой усадки металла отливки более стабильна, чем величина затруднённой усадки модели. Это связано с тем, что, как правило, отливку из формы удаляют после её полного охлаждения до комнатной температуры. То есть в момент выбивки из формы все части отливки имеют одинаковую температуру и, следовательно, практически одинаковую величину затруднённой усадки.

В отличие от отливки, модель из пресс-формы извлекают через определённое время, как правило, не ожидая её полного охлаждения. Это связано с тем, что, во-первых, длительность охлаждения всех частей модели до комнатной температуры может составлять несколько часов, во-вторых, при полном охлаждении модели в пресс-форме велика вероятность образования в ней трещин. В связи с этим модель извлекают из пресс-формы с температурой, несколько большей, чем температура окружающей среды, имея, как результат, определённую величину коробления модели в целом, и различную величину общей усадки различных частей модели, в частности.

Градиент температуры между различными частями модели относительно невелик, однако при этом необходимо помнить, что величина температурного интервала охлаждения от температуры запрессовки пастообразного модельного состава в пресс-форму до комнатной температуры составляет около 40°C . Поэтому при градиенте температуры даже в 10°C , учитывая, что КТЛР модельного состава составляет около $(130...150) \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, отклонения значений затруднённой линейной усадки элементов модели различного поперечного сечения и протяжённости от их средней величины могут быть значительными.

Таким образом, в зависимости от толщины стенок модели и её габаритных размеров, длительности выдержки модели в пресс-форме и т.п., величина затруднённой усадки модели или её элемента может изменяться от 0,4% до 0,9%, при величине свободной линейной усадки – 1%. При этом, помимо указанных факторов, на величину как свободной, так и затруднённой усадки, оказывает влияние температура пресс-формы, габаритные размеры элементов отливки и их конфигурация, температура и давление запрессовки и т.п. Следует отметить, что различие величин усадок различных элементов также является одной из причин коробления модели.

Собственно, в правильном назначении величин усадок для всех частей модели и отливки и состоит основная сложность расчёта размеров формообразующих поверхностей пресс-форм.

Практически конструкция каждой отливки представляет собой сочленение стенок различной толщины и конфигурации. Рассмотрим влияние конфигурации отливки на характер усадки отдельных частей модели в пресс-форме на примере плоской отливки "Решётка".

На рис. 2.42,а представлен общий вид рабочей полости пресс-формы отливки "Решётка" с указанием и нумерацией её основных контурных точек.

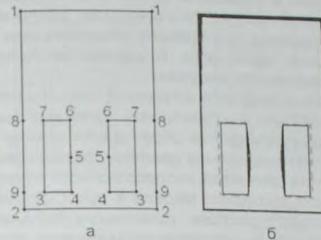


Рис. 2.42. Схема рабочей полости пресс-формы отливки "Решётка" (а) и контуры реальной модели (б)

свободную усадку, а на участке 7-7 – затруднённую. Аналогичная ситуация наблюдается и на участке между точками 9-9, где на участке 9-3 модель имеет свободную усадку, а на участке между точками 3-3 – затруднённую.

В случае полного охлаждения модели в пресс-форме, модель отливки приобретёт форму, изображённую на рис. 2.42,б, где толщина контурных линий, выполненная относительно контуров формообразующей поверхности в пресс-форме, пропорциональна величине усадки различных частей модели.

В том случае, если модель отливки извлечь из пресс-формы до её полного охлаждения, величины усадок её отдельных элементов несколько изменятся, сохраняя направление, но изменив характер. То есть затруднённая усадка изменится на усадку свободную. При этом усадка элементов модели, испытывавших прежде затруднённую усадку, увеличится. По величине усадка этих элементов будет находиться между величиной свободной усадки и усадки затруднённой. Для рассматриваемого случая величину смешанной усадки этих элементов в первом приближении можно рассчитать по формуле (%):

$$\alpha_{см} = \frac{\alpha_{м3} \cdot (0,97 \cdot t_{3МЛ} - t_{3М}) + \alpha_{м1} \cdot (t_{3М} - t_{1Б})}{t_{3МЛ} - t_{1Б}}, \quad (2.23)$$

где $\alpha_{м3}$ и $\alpha_{м1}$ – коэффициент затруднённой и свободной линейной усадки модельного состава соответственно, %; $t_{3М}$ – температура элемента модели в момент извлечения модели из пресс-формы, $^{\circ}\text{C}$; $t_{3МЛ}$ и $t_{1Б}$ – температура запрессовки модельного состава и температура, до которой охлаждается модель на воздухе (температура воздуха в модельном отделении цеха), соответственно, $^{\circ}\text{C}$.

Кроме того, в связи с более длительным временем охлаждения центральной планки (6-6-4-4) отливки в условиях свободной усадки, произойдёт определённое коробление более тонких наружных планок (7-8-9-3).

Таким образом, рассчитывая размерную цепь с учётом погрешностей, связанных с колебаниями усадки модельного состава и металла отливки, объёмными изменениями КО в процессе всего технологического цикла, конструктор назначает размеры формообразующих полостей пресс-формы. При этом, как было отмечено выше, поля допусков для внутренних охватываемых размеров детали назначаются со знаком плюс и для наружных охватываемых размеров – со знаком минус.

Помимо линейной усадки, материал модели и отливки в процессе затвердевания и охлаждения испытывают ещё и объёмную усадку. Значительная объёмная усадка в термических узлах отливки сопровождается, как правило, образованием в них усадочных раковин, рыллот или усадочной пористости. В модели объёмная усадка является причиной появления утяжин в термических узлах.

Для предупреждения образования усадочных дефектов в термических узлах отливок на термические узлы устанавливают приёмы, холодильники, понижают температуру заливки расплава в форму и т.п. Предупреждение образования утяжин в термических узлах модели осуществляют за счёт повышения давления запрессовки модельного состава в пресс-форму, увеличения диаметра запрессовочного отверстия в пресс-форме, уменьшения длительности выдержки модели в пресс-форме, использования более теплопроводного модельного состава, установки в термический узел модели компенсирующего элемента или выполнения термического узла полым и т.д.

На рис. 2.43 (б...г) представлены схемы реализации некоторых способов предотвращения образования утяжин в термическом узле модели. Для сравнения на рис. 2.43,а представлен разрез пресс-формы 1 с затвердевшей в ней моделью 2. Утяжины, образовавшиеся в тепловом узле модели на рис. 2.43,а, обозначены цифрой 3.

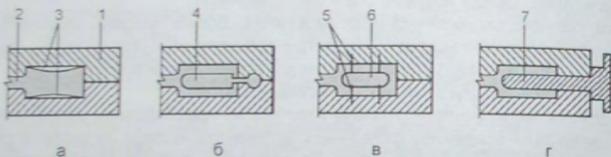


Рис. 2.43. Способы предупреждения образования утяжин в тепловом узле модели

Согласно схеме, приведенной на рис. 2.43,б и рис. 2.43,в, избежать образования утяжин в термическом узле модели можно за счёт установки в нем компенсирующего элемента 4, выполненного из того же модельного состава, что и сама модель. При этом компенсирующий элемент 4 крепят знаковой частью в пресс-форме (см. рис. 2.43,б) либо компенсирующий элемент 6 крепят с помощью постоянных жеребеек 5, выполненных в виде шпилек, что схематично представлено на рис. 2.43,в.

Одним из вариантов предупреждения образования утяжин (см. рис. 2.43,г) является выполнение в термическом узле полости за счёт установки в него металлического стержня 7.

После извлечения модели из пресс-формы выступающую часть компенсирующего элемента (см. рис. 2.43,б) срезают. Отверстия, оставшиеся в теле модели от жеребеек пресс-формы (см. рис. 2.43,в), шпательюют пастообразным модельным или ремонтным составом. Аналогичным образом поступают с полостью в термическом узле модели в случае использования металлического стержня (см. рис. 2.43,г).

Литниковые каналы пресс-формы. Литниковые каналы в пресс-формах должны быть короткими, с компактной формой, определённой величиной площади поперечного ("живого") сечения и иметь минимальное число поворотов. При этом, литниковый канал должен быть подведен в наибольший термический узел модели, что схематично представлено на рис. 2.44.

Площадь поперечного сечения литниковых каналов пресс-формы зависит от исходного состояния модельного состава, используемого для изготовления модели.

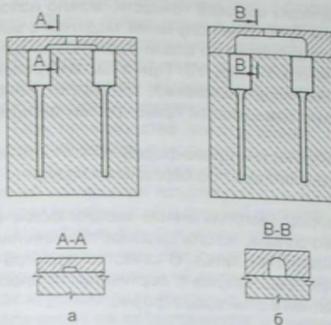


Рис. 2.44. Схема литниковых каналов пресс-формы для изготовления моделей из воздушнонаполненных (а) модельных составов и модельных составов, не содержащих воздух (б)

В случае если запрессовываемый модельный состав содержит воздух (воздушнонаполненные модельные составы), то сечения литниковых каналов пресс-формы должны быть невелики. То есть диаметр окружности, вписанной в поперечное сечение литникового канала, может быть в 2 и более раз меньше диаметра окружности, вписанной в термический узел модели, к которому подведен литник, но не менее 2 мм.

В случае, если для изготовления моделей в данной пресс-форме используют модельный состав, не содержащий воздух, в пастообразном состоянии, то диаметры вышеуказанных вписанных окружностей должны быть равными либо отличаться не более чем на 30% в сторону уменьшения

диаметра окружности, вписанной в сечение литника. В противном случае в термическом узле модели, к которому подведен литник, может возникнуть утяжина.

Шероховатость поверхности пресс-формы. Как было отмечено выше, шероховатость поверхности отливок, при всех прочих равных условиях, находится в прямой зависимости от шероховатости формообразующих поверхностей пресс-формы. В связи с этим формообразующие поверхности металлических пресс-форм, изготовленных механическим способом, полируют. Кроме того, формообразующие поверхности стальных пресс-форм, во избежание их коррозии, покрывают никелем или хромом методом гальванопластики.

Допустимая величина шероховатости других поверхностей пресс-форм приведена в табл. 2.16.

Таблица 2.16
Допустимые шероховатости поверхностей пресс-форм

Поверхности пресс-формы	Допустимая шероховатость поверхности, мкм
Поверхности сопрягающиеся, штырей, втулок и т.п.	Ra=1,25-0,63
Поверхности, образующие элементы ЛПС	Ra=2,5-1,6
Поверхности нерабочих частей пресс-формы	Rz=40-1,6

Металлические пресс-формы, изготовленные механической обработкой. Металлические пресс-формы из стали или алюминиевого сплава, изготовленные из литой, ковальной или катаной заготовки путём механической обработки на металлорежущих станках нашли наибольшее распространение в цехах серийного или массового производства литья по выплавляемым моделям. Данным способом изготавливают пресс-формы простой и сложной конструкции, одноместные (на одну модель в пресс-форме) и многоместные, с горизонтальной и вертикальной плоскостью разреза, с системой внутреннего принудительного охлаждения и без неё и т.д.

Для изготовления пресс-форм, не требующих высокой точности, можно использовать алюминиевые сплавы марок АК-4 или Д-16. Для получения моделей с высокой размерной точностью пресс-формы изготавливают из стали марки Ст.45 (улучшенная) или высокоуглеродистых сталей марок У7 или У8. При этом внутреннюю полость стальной пресс-формы, во избежание корродирования, хромируют, нанося слой хрома толщиной 10...20 мкм. Остальные поверхности пресс-формы оксидируют.

Качество выполнения сопрягаемых поверхностей пресс-формы (плотность контакта между полуформами пресс-формы) контролируют по берлинской лазури (4...6 точек на 1 см² сопрягаемых поверхностей).

Ручные пресс-формы. Ручные пресс-формы, изготовленные механической обработкой из стали, латуни или алюминиевого сплава, нашли широкое применение в условиях мелкосерийного и серийного производства литья. В качестве примера на рис. 2.45 представлена ручная, одноместная пресс-форма с вертикальной плоскостью разъёма, а также вид модели 1, полученной в этой пресс-форме.

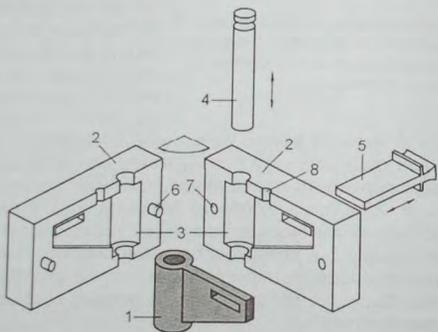


Рис. 2.45. Ручная пресс-форма и модель отливки

В состав конструкции данной пресс-формы входят: полуформы 2, стержень прямоугольного сечения 5, стержень круглого сечения 4. Для обеспечения центровки (соосности) одна из полуформ оснащена направляющими штырями 6, а другая полуформа, соответственно, имеет направляющие втулки 7. Запрессовку модельного состава проводят через запрессовочное (литниковое) отверстие 8.

Перед началом работы сопрягающиеся и формообразующие поверхности пресс-формы очищают от остатков модельного состава и случайных частиц с помощью деревянных или пластмассовых лопаток и спиц. Очищенные поверхности обдувают сжатым воздухом и протирают ветошью, слегка пропитанной разделительной жидкостью (например, раствором трансформаторного масла в керосине, индустриального масла в этиловом спирте, полиметилсилоксановой жидкостью, жидким мылом, мыльной водой и т.п.).

Подготовленную пресс-форму собирают, вводя направляющие штыри во втулки. После этого в пресс-форму до упора в соответствующие отверстия вводят стержни. Половинки собранной пресс-формы скрепляют скобами, оснащёнными винтами.

В собранном состоянии пресс-форму подают под запрессовку модельного состава. После запрессовки и определённой выдержки модельного состава в пресс-форме из запрессовочного отверстия пресс-формы с помощью ножа (ланцета, рают и извлекают модель. Впоследствии все вышеописанные операции по производству модели повторяют.

При производстве толстостенных моделей, во избежание перегрева пресс-формы, её вместе с моделью, не разбирая пресс-формы, охлаждают в воде в течение 2...5 мин. Если модель из разобранной пресс-формы извлекается трудно, то между телом модели и стенкой рабочей полости пресс-формы, струю которого направляют в зазор.

Некоторые отливки имеют настолько сложную конфигурацию, что изготовить отдельные элементы или поверхности модели с использованием металлических влечёт резкое усложнение конструкции пресс-формы, которое, в свою очередь, приводит к увеличению её себестоимости и снижению точности модели. В таких случаях для выполнения внутренних полостей модели используют водорастворимый стержень.

На рис. 2.46 представлен вид сверху одной из полуформ ручной одноместной пресс-формы с установленным в неё водорастворимым стержнем. Данная пресс-форма состоит из двух полуформ 1 ("зеркальных" по конфигурации своих формообразующих полостей), скрепляющихся посредством накидных болтов и гаек типа "барашек". Центровка полуформ осуществляется посредством направляющих штырей 2, выполненных в одной полуформе, и, соответственно, направляющих втулок, выполненных в другой полуформе. Для установки водорастворимого стержня 5 в пресс-форме выполнены знаковые части. На одной из знаковых частей в пресс-форме выполнен фиксирующий паз. Соответственно, на знаковой части водорастворимого стержня выполнен фиксирующий буртик 6, который при установке стержня в пресс-форму должен войти в фиксирующий паз. Запрессовку модельного состава в собранную пресс-форму проводят через запрессовочное отверстие 3, сообщающееся с рабочей полостью пресс-формы через литниковый ход 4.

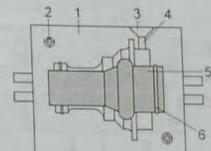


Рис. 2.46. Полуформа пресс-формы с установленным в неё водорастворимым стержнем

Непосредственно перед сборкой пресс-формы подготавливают по вышеописанной схеме её сопрягающиеся и формообразующие поверхности. Затем в одну из полуформ укладывают водорастворимый стержень и после установки второй полуформы проводят скрепление полуформ.

После запрессовки модельного состава пресс-форму разбирают, извлекают модель с водорастворимым стержнем, выдерживают модель на воздухе в течение 1...3 ч и погружают в ванну с проточной водой для растворения стержня. Пресс-форму, после извлечения из неё модели, возвращают для проведения операций подготовки, установки следующего водорастворимого стержня и сборки под запрессовку модельного состава.

Помимо водорастворимых стержней, в ручных пресс-формах используют керамические стержни или, для титанового литья, графитовые стержни. В некоторых случаях ручную пресс-форму выполняют комбинированной, применяя вставные вкладыши из пластмассы, латуни, бронзы, сплава Вуда или алюминиевого сплава.

Вышеописанные конструкции пресс-форм не оснащены толкателями – штырями для извлечения модели из пресс-формы. В связи с этим в ряде случаев, как было отмечено выше, для извлечения модели из пресс-формы прибегают к использованию струи сжатого воздуха, направляемой в зазор между моделью и пресс-формой.

В случае, если модель тонкостенна и имеет значительные габариты или, напротив, мер, в пресс-форме изготавливается модельное звено (звенья), то для извлечения нащёпленные толкателями.

Пресс-формы с горизонтальной поверхностью разъёма, оснащённые толкателями, используют преимущественно в условиях единичного и серийного производства отливок. При этом пресс-формы данного типа могут быть как одноместными, так и многоместными.

На рис. 2.47 представлен разрез собранной ручной пресс-формы с горизонтальной поверхностью разъёма, оснащённой толкателями, где обозначены: 1 – опорная плита, 2 – нижняя полуформа, 3 – верхняя полуформа, 4 – опорные стойки, 5 – толкатель, 6 – подвижная плита, 7 – запрессовочное отверстие, 8 – рукоятки.

Крпление полуформ между собой проводят с помощью накидных болтов и гаек типа “барашек”. Центровка полуформ осуществляется посредством направляющих штырей и втулок, выполненных в полуформах.

Запрессовку модельного состава в пресс-форму проводят через запрессовочное отверстие 7. После запрессовки и определённой выдержки модельного состава в пресс-форме с помощью ножа из отверстия 7 удаляют

пресс-остаток модельного состава, раскрепляют полуформы и снимают верхнюю полуформу. Для извлечения модели из нижней полуформы при помощи рукояток 8 поднимают подвижную плиту 6 (вместе с толкателем 5) в крайнее верхнее положение. После извлечения модели из пресс-формы подвижную плиту возвращают в исходное крайнее нижнее положение, что соответствует виду пресс-формы, представленному на рис. 2.47.

На предприятиях используют пресс-формы с толкателями самых разнообразных конструкций, направленных, как правило, на облегчение работ по сборке-разборке пресс-формы и удалению из неё модели.

Автоматизированные пресс-формы. Автоматизированные пресс-формы (одноразовые или многоместные пресс-формы с вертикальной поверхностью разъёма) предназначены для автоматизированного производства моделей и модельных звеньев из пастообразных модельных составов в условиях серийного, крупносерийного или массового выпуска мелкого литья. Автоматизированные пресс-формы используют либо на десятипозиционном автомате модельных звеньев, например, автомате мод 653 (см. рис. 2.48), либо на однопозиционном автомате (стенде) мод. 655 (см. рис. 2.53).

На десятипозиционном автомате устанавливают десять автоматизированных стальных пресс-форм, на которых в автоматическом режиме выполняются следующие технологические операции: обдув сжатым воздухом рабочих полостей пресс-форм, нанесение на рабочие поверхности пресс-форм смазки, удаление из литникового отверстия пресс-форм пресс-остатка модельного состава, закрытие пресс-

форм, запрессовка модельного состава в пресс-формы, охлаждение моделей в пресс-формах, раскрытие пресс-форм, выталкивание из пресс-форм моделей в водной конвейер.

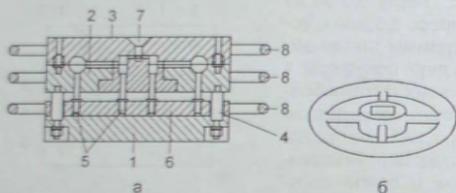


Рис. 2.47. Ручная пресс-форма с толкателями (а) и модель отливки, получаемая в ней (б)

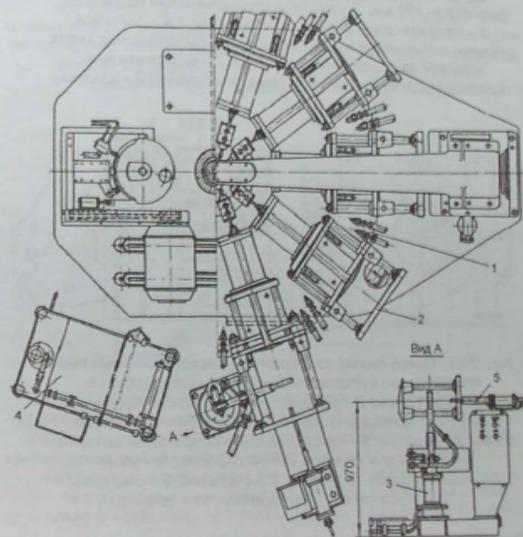
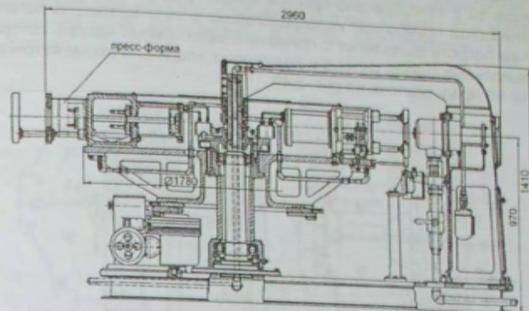


Рис. 2.48. Автомат мод. 653: 1 – стол автомата; 2 – подставка; 3 – механизм обдува рабочих поверхностей пресс-форм сжатым воздухом; 4 – водяной конвейер; 5 – механизм очистки литниковых отверстий пресс-форм от затвердевшего модельного состава

Автоматизированные пресс-формы (рис. 2.49...рис. 2.52) состоят из подвижной и неподвижной частей, в которых расположены матрицы. В матрицах выполнены формообразующие поверхности (рабочие полости) пресс-формы.

Для моделей с относительно простой конфигурацией рабочие полости выполняются механической обработкой непосредственно в теле матриц. В остальных случаях рабочие полости выполняют с применением съемных частей, которые монтируют в специальные гнезда матриц и поджимают опорной и промежуточной плитой, что схематично представлено на рис. 2.49.

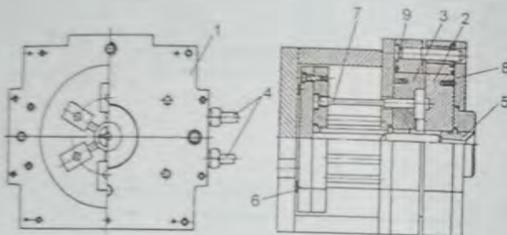


Рис. 2.49. Бесстержневая пресс-форма: 1 – блок матриц с диаметром 170 мм; 2 – матрица цилиндрическая подвижная; 3 – матрица цилиндрическая неподвижная; 4 – патрубки системы охлаждения; 5 – приспособление выталкивания звена моделей из пресс-формы; 6 – упор; 7 – выталкиватель цилиндрический; 8 – труба системы охлаждения; 9 – шпонка

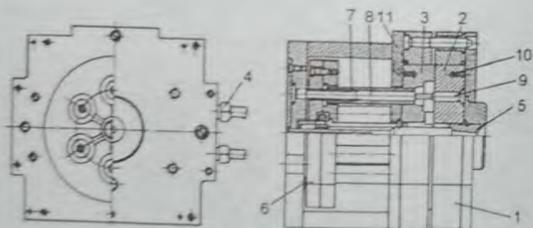


Рис. 2.50. Пресс-форма со стержнями, расположенными перпендикулярно к плоскости разреза: 1 – блок матриц с диаметром 170 мм; 2 – матрица цилиндрическая подвижная; 3 – матрица цилиндрическая неподвижная; 4 – патрубки системы охлаждения; 5 – приспособление опережения выталкивателей звена моделей из пресс-формы; 6 – упор; 7 – выталкиватель трубчатый; 8 – стержень; 9 – стержень; 10 – труба системы охлаждения; 11 – шпонка

При раскрытии пресс-формы затвердевшая и охладившаяся модель должна оставаться в неподвижной части пресс-формы. Для этого выступающие части формообразующих поверхностей, обжимающиеся моделью при охлаждении и имеющие наибольшую площадь сечения, выполняют в неподвижной матрице. Разъем автоматизированных пресс-форм рекомендуется выполнять в одной плоскости. В случае

невозможности выполнения разреза матриц в одной плоскости, плоскость разреза следует выполнять по кривой поверхности или ступенчатой плоскости с использованием вставок.

Во избежание относительного смещения матриц совмещение обеих частей пресс-формы фиксируется штырями и втулками под них. При этом штыри устанавливаются в неподвижной части пресс-формы, а втулки, соответственно, в подвижной

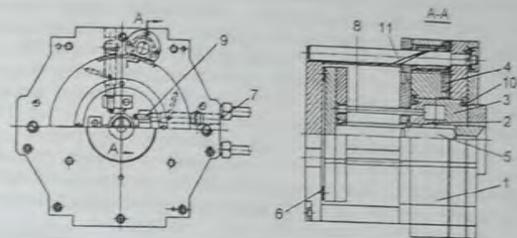


Рис. 2.51. Пресс-форма с дисковым копиром и приспособлением выталкивания моделей: 1 – блок матриц с диаметром 230 мм; 2 – матрица цилиндрическая неподвижная; 3 – матрица цилиндрическая подвижная; 4 – копир дисковый; 5 – приспособление выталкивания звена моделей из пресс-формы; 6 – упор; 7 – патрубки системы охлаждения; 8 – выталкиватель цилиндрический; 9 стержень; 10 – труба системы охлаждения; 11 – шпонка

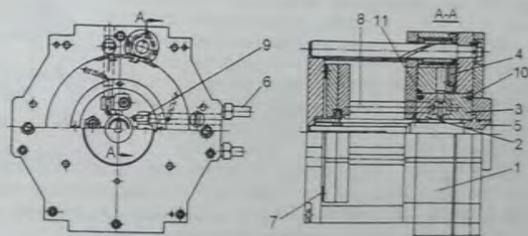


Рис. 2.52. Пресс-форма с дисковым копиром и приспособлением опережения выталкивателей моделей: 1 – блок матриц с диаметром 230 мм; 2 – матрица цилиндрическая неподвижная; 3 – матрица цилиндрическая подвижная; 4 – копир дисковый; 5 – приспособление опережения выталкивания звена моделей из пресс-формы; 6 – патрубки системы охлаждения; 7 – упор; 8 – выталкиватель трубчатый; 9 – стержень; 10 – труба системы охлаждения; 11 – шпонка

Запрессовку пастообразного модельного состава в пресс-форму осуществляют через центрирующую втулку, установленную в подвижной части пресс-формы. В некоторых конструкциях автоматизированных пресс-форм установлен обратный

клапан, позволяющий поддерживать оптимальное давление в затвердевающем модельном составе. Использование обратного клапана позволяет не только стабилизировать размеры моделей, но и существенно уменьшить брак моделей по утяжнению.

Внутренние полости и отверстия в моделях выполняют с помощью подвижных или неподвижных постоянных стержней, расположение которых определяется конфигурацией модели отливки. Подвижные стержни устанавливают в неподвижной части пресс-формы. Соответственно неподвижные стержни устанавливают в подвижной части пресс-формы. Съём модели из пресс-формы осуществляется при помощи выталкивателей, установленных на специальной плите, приводимой в движение толкателями плиты подставки автомата модельных звеньев. При разработке конструкции пресс-формы, во избежание поломки модели или модельного блока, выталкиватели располагают поближе к частям модели, наиболее "заторможенным" в результате усадки модельного состава в пресс-форме.

При использовании неправильно спроектированной пресс-формы нередки случаи получения моделей с недопрессовкой (неоформлением тела). Наличие данного дефекта связано с плохой вентиляцией пресс-формы, в результате чего воздух из отдельных рабочих полостей пресс-формы при запрессовке модельного состава не удаляется и препятствует заполнению полостей пресс-формы пастообразным модельным составом.

С целью улучшения вентиляции пресс-формы, формообразующую поверхность пресс-формы подвижной матрицы выполняют из отдельных отъемных частей, которые монтируют в гнезда матрицы и поджимают опорной плитой. За счёт этого выход воздуха из рабочих полостей пресс-формы осуществляется через посадочные зазоры.

Длительная и непрерывная работа автоматизированных пресс-форм требует поддержания на их формообразующих поверхностях постоянной температуры (в пределах от 22 до 25°C), что обеспечивает требуемый уровень оборачиваемости пресс-форм и качество изготовленных моделей отливок. С этой целью в автоматизированных пресс-формах выполняют водяное охлаждение. Охлаждающую проточную воду в пресс-формах пропускают в матрицах по специальным медным трубкам, установленным в каналах матриц.

Как и любая другая пресс-форма, после изготовления автоматизированная пресс-форма проходит отладку и испытания. Для отладки и испытаний автоматизированных пресс-форм используют стенд мод. 655, общий вид которого представлен на рис. 2.53, а его технические параметры приведены в табл. 2.17.



Рис. 2.53. Стенд мод. 655

Технические параметры стенда мод. 655

Параметры	Значения
Производительность, звеньев/ч	20-40
Максимальные размеры пресс-форм, мм	240×240×240
Размеры поверхности плит для крепления пресс-форм, мм: длина×ширина	250×250
Наименьшее расстояние между плитами, мм	240-12
Количество одновременно устанавливаемых пресс-форм, шт	1
Усилие смыкания пресс-форм при давлении 0,5 МПа, кН	10
Расход сжатого воздуха (при давлении 0,5 МПа), м³/ч	1
Расход воды для охлаждения пресс-форм (при температуре 8-12°C), м³/ч	0,2
Габаритные размеры, мм, не более: длина×ширина×высота	1200×700×1315
Масса, кг	280

Таблица 2.17

Стенд мод. 655 (Изготовитель – ГУП "Тираспольский завод литейных машин им. С.М.Кирова", Молдова) предназначен для отладки и испытания автоматизированных пресс-форм перед установкой их на автоматы, изготавливающие модели и модельные звенья, и является обязательным средством технологического оснащения цехов и участков по производству отливок методом литья по выплавляемым моделям, использующих автоматизированные пресс-формы.

При подключении к агрегату для приготовления модельного состава стенд мод. 655 также используют для изготовления моделей отливок и литников в условиях мелкосерийного производства мелкого литья.

Литые металлические пресс-формы. Литые металлические пресс-формы нашли широкое распространение для получения моделей в условиях единичного и мелкосерийного производства несложных отливок и их ЛПС.

Как правило, в конструкцию литой металлической пресс-формы входят: корпус, стальные направляющие штыри, втулки, и, в некоторых случаях, стальные толкатели и стержни. Корпус пресс-формы изготавливают сваркой из листовой стали или методом литья из алюминиевого сплава.

В качестве примера на рис. 2.54 представлена иллюстрационная схема основных этапов изготовления литой металлической пресс-формы отливки "Поводок" (см. рис. 2.54,а).

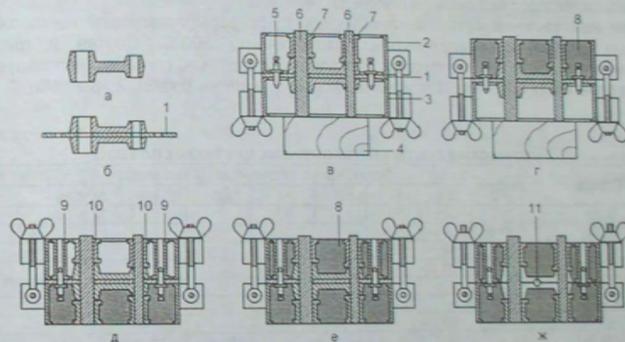


Рис. 2.54. Схема этапов изготовления литой металлической пресс-формы

Для получения рабочих и сопрягаемых поверхностей пресс-формы используют разрезанный по линии разъёма пресс-формы (см. рис. 2.54,б) металлический эталон модели (модель-эталон, мастер-модель), установленный по разъёму пресс-формы на стальной плите 1, что схематично представлено на рис. 2.54,в. Как правило, эталон изготавливают из алюминиевого или цинкового сплава, а в некоторых случаях – из стали или латуни.

Для изготовления пресс-формы эталон, закреплённый на плите (см. рис. 2.54,б), размещают по плоскости разъёма пресс-формы, закрепляя его между верхней 2 и нижней 3 обечайкой корпуса (см. рис. 2.54,в). Скрепление конструкции проводят с помощью накидных винтов и гаек типа "барашек".

Скреплённую конструкцию устанавливают на горизонтальную подставку 4, в отверстия, заранее выполненные в стальной плите, вставляют центрующие штыри 5 и

стержни 6, изготовленные из стали или титана. На стержни 6, выполняющие впоследствии отверстия в модели, надевают направляющие втулки 7. В таком виде пространство, оставшееся между установленными элементами и нижней частью обечайки пресс-формы, заполняют расплавом легкоплавкого цветного сплава 8 (см. рис. 2.54,г).

После затвердевания и охлаждения залитого металла до комнатной температуры, конструкцию кантуют на 180° , на направляющие стержни 5 и формообразующие стержни 6 надевают соответственно направляющие втулки 9 и центрующие втулки 10 (см. рис. 2.54,д) и заливают расплав легкоплавкого цветного сплава в свободное пространство в обечайке (см. рис. 2.54,е). По окончании затвердевания и охлаждения залитого металла из пресс-формы извлекают стержни 6, обечайку раскрепляют и удаляют эталон с плитой. При необходимости, полученные формообразующие поверхности пресс-формы ремонтируют. После сборки по месту сопряжения полуформ, в соответствующем месте, высверливают литниковое отверстие 11 (см. рис. 2.54,ж), для запрессовки модельного состава. Готовую пресс-форму собирают, скрепляя полуформы и устанавливая стержни.

В случае использования для изготовления пресс-формы сплава с температурой плавления более 250°C перед заливкой расплава в обечайку рекомендуется предварительно нагреть эталон до температуры, которая будет на $30...50^\circ\text{C}$ ниже температуры кристаллизации заливаемого сплава. При этом величина перегрева заливаемого сплава должна быть не более $30...40^\circ\text{C}$.

Для изготовления литых металлических пресс-форм используют легкоплавкие цветные сплавы с температурой плавления до 600°C . Состав и физико-механические свойства некоторых легкоплавких цветных сплавов, используемых для изготовления литых металлических форм, приведены в табл. 2.18 и табл. 2.19.

Химический состав легкоплавких цветных сплавов

Сплав	Содержание элементов, % (по массе)						
	Pb	Sn	Bi	Sb	Al	Zn	другие
Вуда	25	12,5	50	-	-	-	12,5 Cd
Bi-Pb	44,5	-	55,5	-	-	-	-
Bi-Sn	-	42	58	-	-	-	-
Sn-Bi-Pb	30	35	35	-	-	-	-
Pb-Sn-Bi	70	15	15	-	-	-	-
Pb-Sb	87	-	-	13	-	-	-
Pb-Sn-Sb	56	33	-	11	-	-	-
ЦАМ 4-1	-	-	-	-	4	95-96	0,75-1,25 Cu, 0,08-0,10 Mg
AK12 (АЛ2)	-	-	-	-	87-90	-	10-13 Si

Таблица 2.18

Физико-механические свойства легкоплавких цветных сплавов

Сплав	Физико-механические свойства			
	T пл, $^\circ\text{C}$	σ_B , МПа	НВ	ρ , кг/м ³
Вуда	66	41,2	9,2	9400
Bi-Pb	124	44,1	10,2	10500
Bi-Sn	138	54,9	22	8700
Sn-Bi-Pb	140	-	-	9100
Pb-Sn-Bi	140	-	-	10100
Pb-Sb	247	49	30	10500
Pb-Sn-Sb	315	54,9	-	9100
ЦАМ 4-1	430	235-274	70-85	7100
AK12 (АЛ2)	600	147-157	50-60	2700

Таблица 2.19

Гипсовые пресс-формы. Гипсовые пресс-формы используют для получения единичных моделей мелких отливок и ЛПС, от которых не требуется высокой точности и чистоты поверхности.

По сути, способ изготовления гипсовой пресс-формы аналогичен процессу изготовления литой металлической пресс-формы с той лишь разницей, что основным материалом пресс-формы является гипс.

В этом случае используют стальную обечайку, как правило, с вертикальной плоскостью разреза, а для изготовления гипсовой пресс-формы используют деревянный, металлический или пластмассовый эталон модели, который по горизонтальной плоскости разреза будущей пресс-формы размещают либо на деревянном постаменте, либо на пластмассовой или стальной пластине, как это, например, представлено на рис. 2.55,а.

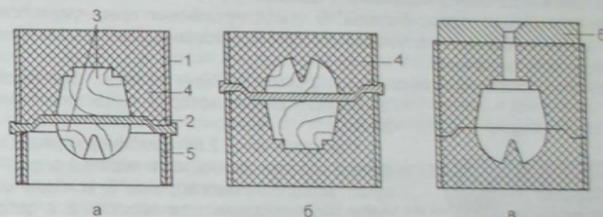


Рис. 2.55. Схема этапов изготовления гипсовой пресс-формы

Перед заливкой гипса поверхность эталона 3, стальной пластины 2 и внутреннюю поверхность обечайки смазывают разделительной жидкостью, в качестве которой можно использовать водный раствор мыла или масло (машинное, трансформаторное, индустриальное, веретённое и т.п.).

После этого половинки обечайки 1 скрепляют между собой с помощью струбцины или скоб, устанавливают в неё эталон 2 на опору 5 и заднюю часть обечайки заполняют её верхней часть гипсовой смесью 4. Для приготовления гипсовой смеси используют (по массе) 7 частей гипса марки (не ниже) Г5 и 3...4 части воды. В некоторых случаях, для повышения прочности, гипсовую смесь армируют металлическими каркасами, выполненными из гнутой стальной проволоки, либо упрочняют гипс путем ввода в гипсовую смесь 15...30% (по массе) цемента.

После затвердения гипсовой смеси (через 30...40 мин) обечайку кантуют на 180° , удаляют опору из обечайки, обратную поверхность эталона, стальной пластины и внутреннюю поверхность обечайки смазывают разделительной жидкостью и, заднюю часть заливают свежеприготовленной гипсовой смесью (см. рис. 2.55,б). По окончании твердения гипсовой смеси во второй полуформе, с пресс-формы снимают обечайку и удаляют из неё эталон. После удаления эталона в одной из полуформ высверливают литниковый ход.

В настоящее время, помимо вышеописанной технологии изготовления гипсовых пресс-форм, существуют и другие технологии, например, использующие пластилин, глину и т.п. [18; 153; 246 и др.].

Для запрессовки модельным составом гипсовые полуформы скрепляют в обечайке при помощи струбцин. Во избежание разрушения пресс-формы наконечником шприца, запрессовочное отверстие в гипсовой полуформе накрывают металлической пластиной с отверстием, что схематично представлено на рис. 2.55,в. Перед

запрессовки модельного состава, во избежание прилипания модели к поверхности пресс-формы и увеличения скорости оборачиваемости пресс-формы, рекомендуются на 2... 10 мин гипсовые части пресс-формы погрузить в холодную воду.

В случае необходимости повышения чистоты поверхности модели, а также увеличения прочности поверхности пресс-формы и во избежание выкрашивания ее верхних слоев (60 г органического стекла на 1 л дихлорэтана), эпоксидной смолой (раствор эпоксидной смолы и ее отвердителя в ацетоне), лаком (раствор лака в ацетоне) и т.п.

Как правило, гипсовые пресс-формы редко используют для запрессовки модельного состава под большим давлением, что объясняется хрупкостью и низкой прочностью гипса. В основном, в гипсовых пресс-формах получают модели методом свободной заливки расплава модельного состава.

Комбинированные пресс-формы. В комбинированных пресс-формах сопрягающиеся и формообразующие поверхности выполняют методом гальванопластики, конструктивную комбинированную пресс-форму поясним на рис. 2.56.

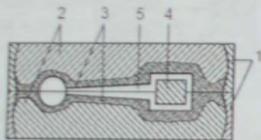


Рис. 2.56. Комбинированная пресс-форма

“Рукоятка”, разрез которой представлен на рис. 2.56.

Согласно рис. 2.56 комбинированная пресс-форма состоит из нижней и верхней опки 1 (корпуса), металлических коронок 3, которые образуют формообразующую полость 5 и сопрягающиеся поверхности пресс-формы, а также легкоплавкого металлического сплава 2. Внутри формообразующей полости пресс-формы установлен стальной или алюминиевый стержень 4.

Пресс-формы, изготовленные методом гальванопластики, используют для изготовления высокоточных несложных моделей малой и средней массы, поскольку особенность выполнения сопрягающихся и формообразующих поверхностей способом металлопластики делает экономически целесообразным данный тип пресс-форм для изготовления моделей, имеющих глубокие карманы, пазы и отверстия.

Метод гальванопластики предполагает формирование изделия путем электролитического осаждения металла на электропроводную поверхность эталона модели отливки и его подмодельной плиты. Для осаждения на поверхность эталона и плиты металлического слоя (никеля или меди) используют эталон модели и плиты, по конструкции аналогичные плите, представленной на рис. 2.54, б, и выполненные из токопроводящих (металлических) материалов. Перед использованием торцы подмодельной плиты покрывают слоем диэлектрического материала (скотча, парафина, электроизоляционной ленты и т.п.). При этом, например, для изготовления медных коронок, половину эталона модели, закрепленные соответствующим образом на плите, погружают в ванну с раствором (электролитом), оставляя их в подвешенном состоянии на электропроводных подвесках. При этом ванна для раствора выполнена из кислотоупорной стали и заполнена раствором (электролитом) следующего состава: вода – 100 л, медный купорос – 15... 20 кг, кислота серная – 0,7... 1,5 кг, спирт этиловый – 3... 5 л.

Температуру электролита в процессе электролитического осаждения, поддерживают в пределах от 18 до 25°C. После погружения эталона модели в раствор к ванне и токопроводной подвеске подают электрический ток плотностью 1... 2 А/м². В тот момент, когда вся поверхность эталона покрывается (“затянется”) слоем меди, по-

дачу тока прекращают, и эталон с подвеской переносят во вторую ванну с электролитом следующего состава: вода – 100 л, медный купорос – 34 кг, кислота серная – 200 г.

Температура электролита во второй ванне – 25... 28°C. В этой ванне эталон с подмодельной плитой выдерживают под током плотностью 5... 8 А/м² до достижения медными коронками требуемой толщины (2... 5 мм). По мере расходования медного купороса в ванну добавляют новые порции медного купороса либо заменяют электролит. Толщина металлизированного слоя на поверхности эталона и плите должна быть не менее 1,5 мм (как правило, от 1,5 до 7 мм).

По окончании изготовления коронок их снимают с поверхности эталона модели и одну из коронок укладывают на горизонтальную поверхность рабочей поверхностью вниз. В дальнейшем на эту коронку устанавливают одну из обечайек будущей пресс-формы таким образом, чтобы вся коронка находилась внутри обечайки. После этого все свободное пространство внутри обечайки над коронкой заполняют либо легкоплавким сплавом, либо эпоксидной смолой с алюминиевым порошком и т.п.

По окончании твердения сплава или смолы эпоксидной изготовленную полуформу кантуют на 180°, в рабочую полость коронок вставляют эталон модели на подмодельной плите, насаживают на эталон вторую коронку и выполняют вышеописанные технологические операции со второй обечайкой, предварительно скрепив обе обечайки между собой.

По окончании изготовления второй полуформы эталон модели с подмодельной плитой из пресс-формы извлекают.

В случае изготовления пресс-формы методом металлизации, разъемный эталон модели изготавливают из алюминиевого сплава, стали, латуни, чугуна, керамики и т.п. В процессе изготовления пресс-формы эталон крепят на плите и устанавливают между обечайками будущей пресс-формы. После скрепления обечайек, непрерывно, в круговую, от края к центру рамки, используя металлолизатор ручного типа, наносят жидкий металл, распыляя его струей сжатого воздуха. По окончании металлизации толщина слоя металла, напыленного на модель-эталон, должна составлять 6... 12 мм.

Технологическая схема изготовления пресс-форм методом плазменного напыления аналогична процессу металлизации. Разница между данными способами изготовления металлических коронок состоит в том, что при плазменном напылении, вместо цинковой проволоки, используют порошки тугоплавких металлов, а в качестве плазмообразующих газов используют водород, аргон или аммиак. В связи с тем, что температура плавления порошкообразных напыляемых металлов значительно выше, чем у цинка, эталон модели выполняют из алюминия, латуни, стали или графита.

После изготовления коронок свободное пространство в обечайке по вышеописанной схеме заполняют наполнительным материалом (гипсовой смесью, пластмассой или легкоплавким металлическим сплавом). В ряде случаев, по окончании данной технологической операции, рабочие поверхности пресс-формы покрывают слоем хрома толщиной 0,02... 0,03 мм.

Пластмассовые пресс-формы. Пластмассовые пресс-формы используют преимущественно в единичном и мелкосерийном производстве отливок либо при обработке конструкций ЛПС в процессе освоения технологии получения той или иной крупногабаритной нетехнологичной отливки. В связи с тем, что пластмассы имеют низкую теплопроводность, данный тип пресс-форм преимущественно используют для изготовления моделей малых размеров, не имеющих значительных перепадов толщины стенок модели.

Наибольшее распространение в качестве материала для пластмассовых пресс-форм получили пластмассы на основе эпоксидных смол. Составы некоторых пластических масс, приготовленных на основе эпоксидных смол, приведены в табл. 2.20.

Состав эпоксидных пластических масс

Таблица 2.20

Назначение материала	Содержание (мас. ч)	
	№ 1	№ 2
Основная пластмасса	Эпоксидная смола ЭД-20 - (100)	Эпоксидная смола ЭД-16 - (100)
Пластификатор	Дибутилфталат - (15)	
Отвердитель	Полиэтиленполиамин - (10) или Гексаметилендиамин - (15)	Полиэтиленполиамин - (13) или Гексаметилендиамин - (15)
Наполнитель	Алюминиевая пудра - (100-140)	Алюминиевая пудра - (120-150)

Технология изготовления пластмассовых пресс-форм аналогична технологии изготовления пресс-форм методом литья. То есть пресс-формы изготавливают с использованием эталона модели, закреплённого на плите. Эталон можно изготавливать практически из любого твёрдого материала. При изготовлении пресс-формы поверхность эталона и плиты, во избежание прилипания смолы, покрывают тонким слоем разделительной жидкости. В качестве разделительной жидкости можно использовать раствор парафина в бензине, пчелиного воска в скипидаре, касторового масла в тиловом или изопропиловом спирте, поливинилового спирта в воде и т.п.

Для заливки эпоксидной смолы в обечайку пресс-формы на эталон эпоксидную смолу разделяют на две примерно равные части. В одну из частей, нагретую до 40...50°C, вливают пластификатор, предварительно нагретый до 80°C, и перемешивают. В другую часть эпоксидной смолы вводят отвердитель. Обе части смолы тщательно перемешивают в течение 20...30 мин, после чего в раствор смолы и отвердителя вводят металлический наполнитель (алюминиевый порошок) и продолжают перемешивать в течение 10...15 мин. Приготовленные растворы смол сливают в единую ёмкость и тщательно перемешивают в течение 30 мин. После перемешивания приготовленную смесь охлаждают до температуры 30...35°C и с максимальной скоростью непрерывной струёй заливают в обечайку пресс-формы на эталон модели, под верхнюю кромку обечайки.

Залитую в обечайку пресс-формы пластическую массу для затвердевания выдерживают в вытяжном шкафу при комнатной температуре в течение 12...18 ч. После окончания отверждения смолы проводят её термическую обработку по следующему режиму: изотермическая выдержка в термостате при 30°C в течение 1 ч; при 40°C - в течение 1 ч; при 60°C - в течение 2-х ч. По окончании проведения трёхступенчатой изотермической выдержки пресс-форму охлаждают до комнатной температуры вместе с термостатом.

Вторую полуформу пресс-формы изготавливают по вышеописанной технологии.

На некоторых предприятиях для изготовления эпоксидных пресс-форм используют два состава. Один из составов (лицевой) готовят по одной из рецептур, приведённых в табл. 2.20. Второй состав (наполнительный) также готовят по одной из рецептур, указанных в табл. 2.20, с той лишь разницей, что количество алюминиевого порошка увеличивают в 4...6 раз по сравнению с его содержанием, указанным в рецептурах табл. 2.20.

В этом случае при изготовлении пресс-формы на поверхность эталона и плиты предварительно наносят кистью, тонкий слой лицевого состава. После этого в обечайку вводят наполнительный состав и с помощью трамбовки уплотняют его. По

окончании уплотнения полуформу на 24 ч оставляют на воздухе, при комнатной температуре. По прошествии указанного времени аналогичным образом осуществляют изготовление второй полуформы.

Пресс-формы из эластичных материалов. Применение эластичных (резиноподобных) материалов (формопласта, силикона, резины и т.п.) значительно упрощает процесс изготовления пресс-форм. Способность эластичных материалов после деформирования во время извлечения модели восстанавливать первоначальную форму позволяет, в буквальном смысле, выворачивать пресс-форму наизнанку, вынимая модели, имеющие обратные уклоны и поднутрения.

Пресс-формы из эластичных материалов недолговечны, низкотеплопроводны и не позволяют получать модели с высокой размерной точностью, однако, простота их изготовления и дешевизна позволяют использовать их для получения небольших моделей в условиях единичного и мелкосерийного производства, в том числе моделей с поднутрениями и обратными уклонами.

Из числа известных эластичных материалов наибольшее распространение получили - формопласт, резина и виксинт.

Принцип получения пресс-форм из формопласта и резины состоит в заливке этих материалов на эталон модели, подвешенный или установленный в центре обечайки. После затвердевания и охлаждения формопласта или полимеризации резины снимают обечайку, а саму пресс-форму разрезают лезвием бритвы или скальпелем на определённое число частей, обеспечивающее свободное извлечение модели из пресс-формы.

Для изготовления пресс-формы из формопласта используют эталон модели, изготовленный из металлического сплава или другого материала, с температурой плавления не ниже 130°C, а также дерева или гипса. С целью получения хорошей рабочей поверхности пресс-формы перед заливкой металлический эталон модели нагревают до 60...70°C, а гипсовый эталон предварительно пропитывают горячей олифой или бакелитовым лаком во избежание интенсивного газовыделения из гипса.

Во избежание термического разложения формопласта его расплавление проводят в масляной бане при температуре 125...130°C. После расплавления расплав формопласта выдерживают 10...20 мин для удаления из него пузырьков воздуха и заливают эталон модели (модель отливки, литников, прибылей и пр.).

При отсутствии готового формопласта его изготавливают самостоятельно. Для изготовления формопласта в металлической ёмкости смешивают и проводят нагрев до 100°C следующих компонентов (по массе): смола полихлорвиниловая - 20%, дибутилфталат - 76%, стеарат кальция - 2%, масло касторовое - 2%. После сплавления компонентов, жидкий формопласт заливают в заранее приготовленную обечайку с установленным в ней эталоном модели. В обечайке залитый формопласт выдерживают до его полного затвердевания и охлаждения до комнатной температуры.

Изготовление резиновой пресс-формы. Для получения пресс-формы из резины (кремнийорганического каучука) следует использовать стальной эталон. Перед заливкой эталона в стальной разъёмной гильзе (обечайке) в каучук вводят катализатор полимеризации. Выдержку каучука в обечайке проводят до окончания процесса полимеризации.

По окончании процесса полимеризации резиновую часть пресс-формы извлекают из обечайки, с помощью ножа разрезают по линии разъёма и извлекают из неё эталон модели. Всплеск в резине вырезают литниковое отверстие, собирают резиновые части пресс-формы и вставляют их в гильзу. Для получения модели собранную пресс-форму заливают жидким модельным составом.

Изготовление силиконовой (вискитовой) пресс-формы. Для изготовления вискитовой пресс-формы эталон модели можно изготавливать из любого материала, в том числе из пластилина, модельного состава и пр. При изготовлении вискитовой пресс-формы выполняют следующую последовательность технологических операций:

- путём механического перемешивания готовят раствор, состоящий (по массе) из 99...96% жидкого вискита марки К-18 и 1...4% катализатора №18;
- удерживая эталон в подвешенном состоянии, его тщательно со всех сторон обмазывают или обливают приготовленным раствором;
- после обмазки, в подвешенном состоянии, эталон на 2...8 ч оставляют на воздухе при комнатной температуре для полимеризации вискита;
- после отверждения лицевого слоя, аналогичным образом на его поверхность наносят слой белой пасты – ВИКСИНТ У—1—18. Перед нанесением в пасту замешивают (по массе) 0,3...0,6% катализатора №18;
- после обмазки, в подвешенном состоянии, эталон на 2...8 ч оставляют на воздухе при комнатной температуре для полимеризации вискита (Время отверждения вискитовых слоёв зависит от содержания в них катализатора, сроков хранения вискитов и температуры окружающей среды);
- по эталону, покрытому вискитом, изготавливают разборный гипсовый кожух, после чего полученную вискитовую оболочку с помощью лезвия бритвы или скальпеля срезают на части таким образом, чтобы из неё без разрушения можно было удалить и эталон модели отливки, и выплавляемую модель отливки.

Впоследствии полученные эластичные части формы собирают в гипсовом кожухе, вставляя их в соответствующие пазы ответных частей, скрепляют кожух струбиной и прорезают (высверливают) литниковое отверстие в гипсе, что схематично представлено на рис. 2.57.

Следует отметить, что помимо хорошо известных двухкомпонентных силиконовых компаундов и герметиков холодной вулканизации типа вискит, для производства пресс-форм используют и другие материалы, например, известные под марками "Силастик Т-4" (ТУ 2513-011-40245042-99), "Пентзласт" (ТУ 2513-011-40245042-99, ТУ 2257-031-40245042-2002) и т.п.

В процессе эксплуатации пресс-форм происходит их износ, в том числе и износ рабочих поверхностей, что также негативно сказывается на размерной точности изготавливаемых моделей и отливок. Степень износа пресс-формы зависит от материала, из которого она выполнена, и свойств используемого модельного состава. Например, износ одной и той же пресс-формы будет значительно выше, если вместо модельного состава типа ПС в неё запрессовывать модельные составы, содержащие твёрдые наполнители.

Проводя выбор материала пресс-формы, помимо всего прочего, следует учитывать и их долговечность, которая определяется как числом моделей, которое можно изготовить в пресс-форме до её выхода из строя по причине износа, так и длительностью хранения пресс-формы. В последнем случае показатель касается пресс-форм, рабочие поверхности которых изготовлены из материалов органического происхождения.

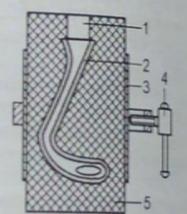


Рис. 2.57. Схема вискитовой пресс-формы:
1 – литниковое отверстие;
2 – вискитовая оболочка;
3 – металлические подкладки; 4 – зажимной винт струбины;
5 – гипсовый кожух

Для сравнительной оценки стойкости пресс-форм в табл. 2.21 указано ориентировочное количество моделей, которое можно получить в одной пресс-форме в зависимости от материала, из которого она выполнена.

Число моделей, изготавливаемых в одной пресс-форме

Материал пресс-формы	Число моделей, шт.	Способ заполнения пресс-формы модельным составом
Сталь	40000–200000	Запрессовка пастообразного модельного состава
Сплав алюминиевый	10000–25000	
Сплав цинковый	5000–7000	
Смола эпоксидная с железным наполнителем	До 1500	Заливка жидкого модельного состава
Фторопласт	До 500	
Гипс	До 500	
Резина, силикон, формопласт	До 200	

Пресс-формы и стержневые ящики для изготовления водорастворимых стержней. Для изготовления водорастворимых стержней методом запрессовки водорастворимого сплава, нагретого до пастообразного состояния, используют пресс-формы, а стержневые ящики используют в случае изготовления водорастворимых стержней методом свободной заливки расплава водорастворимого сплава (вещества).

Пресс-формы и стержневые ящики для изготовления водорастворимых стержней изготавливают как механической обработкой, так и способом литья из легкоплавкого сплава. В качестве материала для пресс-формы и стержневого ящика можно использовать любой металл или металлический сплав, а также пластмассы, способные сохранять свои свойства при нагреве до 135°С, если используемый материал водорастворимого стержня имеет температуру плавления до 130°С.

Наиболее часто для изготовления водорастворимых стержней используют пресс-формы и стержневые ящики, изготовленные из алюминиевого сплава или стали. При проектировании стержневого ящика, предназначенного для изготовления водорастворимых стержней, например, из карбамида или сплава на его основе, следует руководствоваться следующими рекомендациями.

1. Конфигурация стержня определяется конфигурацией внутренней полости модели и крепежными частями стержня – знаками.
2. При расчёте размеров формообразующих полостей стержневого ящика необходимо учитывать усадку стержневого сплава, которую он испытывает при охлаждении после кристаллизации.
3. При проектировании знаковых частей стержня необходимо учитывать следующие рекомендации:

- размеры поперечного сечения знаков должны соответствовать размерам окон в модели;
- длину знака следует назначать исходя из условия обеспечения устойчивого положения стержня в собранной пресс-форме, используемой для изготовления модели;
- у стержней со знаками круглого сечения предусмотреть на знаке фиксаторы, во избежание вращения стержня в собранной пресс-форме, используемой для изготовления модели, в процессе манипуляций с ней;
- поскольку заливку расплава материала водорастворимого стержня проводят через один из знаков в стержневом ящике, то этот знак следует делать открытым, заподлицо с верхней кромкой стержневого ящика;

- за счёт размеров знаковых частей в пресс-форме следует обеспечить зазор между знаками стержня и пресс-формы величиной 0,1...0,5 мм на сторону;
- в том случае, если за счёт знаков стержня невозможно обеспечить его надёжную фиксацию в пресс-форме, используемой для изготовления модели, следует осуществить дополнительную фиксацию стержня с помощью жеробек, выполненных из модельного состава или с помощью металлических шипов, закреплённых в теле пресс-формы, используемой для изготовления модели.

4. Предусмотреть по разъёму стержневого ящика, в его верхней части относительно положения во время заливки, вентиляционные каналы сечением 0,2...0,5 мм.

5. Если расплав в стержневой ящик заливают через питатели, то их диаметр или диаметр окружности, вписанной в сечение питателя, должен быть не менее 10 мм, во избежание полного затвердевания расплава в питателе во время заливки.

6. Не рекомендуется в рабочих полостях стержневого ящика выполнять глубокие карманы и поднутрения.

7. Конструкция стержневого ящика должна обеспечить надёжную фиксацию всех его частей относительно друг друга в процессе работы.

8. Для обеспечения свободного извлечения стержня из стержневого ящика необходимо:

- стенки ящика, оформляющие наружные поверхности стержня, выполнять с уклоном не менее 30°;
- стенки ящика, оформляющие внутренние поверхности стержня, выполнять с уклоном не менее 1°;
- части ящика, формирующие в стержне внутренние каналы, полости, углубления и т.п., выполнять объёмными, извлекаемыми из стержня до раскрытия стержневого ящика;
- в конструкции стержневого ящика предусмотреть несколько плоскостей разъёма;
- в случае опасности разрушения стержня, при его извлечении из стержневого ящика в его конструкции следует предусмотреть рамочные толкатели.

В качестве примера на рис. 2.58,а представлен вид одной из полуформ 2 стержневого ящика, предназначенного для изготовления водорастворимого стержня. Скрепление полуформ осуществляют с помощью накидных болтов и гаек типа "барашек" в цапфах 5. Центровка полуформ осуществляется за счёт направляющих штырей и втулок 3.

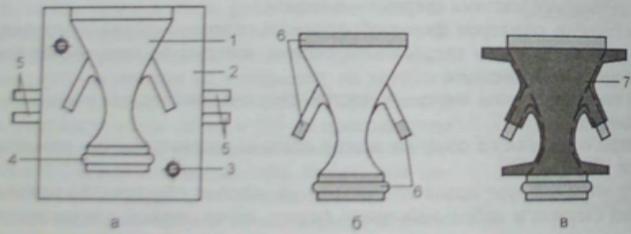


Рис. 2.58. Полуформа стержневого ящика (а), водорастворимый стержень (б) и модель отливки с водорастворимым стержнем (в)

Заливку расплава водорастворимого сплава проводят непосредственно в рабочую полость стержневого ящика 2, через наиболее крупную знаковую часть стержня. Для надёжной фиксации водорастворимого стержня в пресс-форме, на одной его из

знаковых частей выполняют фиксирующий ободок (см. рис. 2.58,б), для чего в стержневом ящике выполнен соответствующий кольцевой лаз 4. Знаковые части стержня 6, полученного в рассматриваемом стержневом ящике, на рис. 2.58,б – затменены.

После полного охлаждения до комнатной температуры стержень извлекают из стержневого ящика, контролируют на наличие на нём дефектов, зачищают, при необходимости, ремонтируют и, впоследствии, используют для изготовления модели. Общий вид модели отливки 7 с рассматриваемым водорастворимым стержнем в её внутренней полости схематично представлен на рис. 2.58,в.

Как и в вышеописанных случаях, перед выполнением чертежей стержневого ящика или пресс-формы под водорастворимый стержень, проводят расчёт размеров их рабочих полостей. Расчёт размеров рабочих полостей стержневых ящиков или пресс-форм, предназначенных для получения водорастворимых стержней, проводят с учётом линейной усадки материала изготавливаемого стержня, которая для водорастворимых стержней, изготовленных на основе карбамида, составляет $\alpha_{вс} = 0,3...0,4\%$ (свободная линейная усадка) и $\alpha'_{вс} = 0,15...0,20\%$ (затрудненная линейная усадка), а также усадки модельного состава при изготовлении модели, расширения КО при её прокаливании и усадки материала отливки при её затвердевании и охлаждении до комнатной температуры.

Пресс-формы для изготовления керамических стержней. В основном керамические стержни получают в результате спекания "сырых" стержней. "Сырые" керамические стержни получают в стальных пресс-формах с полированной формообразующей поверхностью, по технологии, аналогичной технологии изготовления модели.

Внешний вид собранной пресс-формы, предназначенной для изготовления "сырого" керамического стержня, представлен на рис. 2.59, где обозначены: 1 – полуформы пресс-формы; 2 – запрессовочное отверстие (литниковое отверстие); 3 – трубушина; 4 – зажимной винт. При получении весьма тонких и протяжённых стержней пресс-формы дополнительно оснащают выталкивателями стержней.

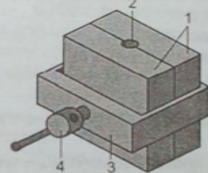


Рис. 2.59. Пресс-форма для изготовления керамических стержней

Керамические стержни являются формообразующими элементами формы, формирующими особо сложные, узкие и протяжённые внутренние полости отливок, в связи с чем к керамическим стержням предъявляют повышенные требования по размерной точности, точности формы и шероховатости поверхности.

Поскольку в отливках особо ответственного назначения используют керамические стержни, изготовленные методом твёрдофазного спекания, то основные изменения размеров стержней проходят на следующих этапах технологии:

- 1 – усадка "сырого" стержня при охлаждении в пресс-форме;
- 2 – усадка при высокотемпературном спекании (обжиге) стержня;
- 3 – расширение при нагреве стержня вместе с КО под заливку металлом;
- 4 – расширение при нагреве за счёт теплоты перегрева и кристаллизации металла.

Расчёт размеров рабочих полостей пресс-формы для изготовления керамических стержней проводят с учётом изменения размеров керамического стержня, которые он испытывает на всех этапах его производства и применения.

В литье по выплавляемым моделям литниково-питающая система (ЛПС) – это система каналов, оформленная телом КО (формы), по которым жидкий металл поступает в полость отливки с момента заливки КО (формы) до окончания затвердевания отливки.

Основное назначение ЛПС – обеспечение поступления расплава в рабочую полость КО (формы) извне. Помимо этого, ЛПС в литье по выплавляемым моделям является основным несущим элементом конструкции модельного блока и предназначена для создания условий получения качественной отливки, для чего она должна обеспечить:

- быстрое и полное заполнение рабочей полости КО (формы) расплавом без его разбрызгивания и вспенивания;
- в случае коллективной ЛПС – одинаковые условия заполнения и питания для всех отливок в блоке;
- последовательность заполнения рабочей полости КО (формы) расплавом из питателей, расположенных на различных уровнях отливки, не создавая в КО (форме) замкнутых воздушных полостей;
- последовательность затвердевания залитого расплава в направлении отливка → питатель → (коллектор, стояк) или отливка → прибыль;
- достаточное питание расплавом всех элементов затвердевающей отливки;
- компактность и технологичность модельного блока;
- удобство сборки и контроля качества сборки модельного блока;
- удобство нанесения и требуемое качество сушки огнеупорного покрытия на блоке;

- максимально полное удаление модельного состава при его выплавлении из КО (формы);

- жёсткость и прочность как конструкции модельного блока, так и КО;
- устойчивость КО при её хранении, формовке, прокаливании и заливке;
- удобство отделения отливки от элементов ЛПС;
- максимально возможный выход годного литья;
- минимально возможную трудоёмкость разделки элементов ЛПС для их последующего использования в качестве шихты;
- механизацию и автоматизацию производства литья, унификацию используемой оснастки.

В идеале – все элементы ЛПС должны выполняться заодно с моделью отливки (в одной пресс-форме). Это требование обусловлено тем, что с увеличением числа стыкующихся или паяемых элементов ЛПС в модельном блоке, пропорционально увеличивается вероятность появления в отливке засоров.

Данная закономерность объясняется тем, что при сборке элементов модельного блока встык (звеньевая сборка) или методом пайки всегда существует вероятность сохранения щели, выходящей на поверхность блока, между стыкующимися или паяемыми элементами. Вследствии попавшая в эту щель огнеупорная суспензия (при нанесении огнеупорного покрытия на модельный блок) образует в её полости керамический «гребешок», как правило, не удаляющийся из внутренней полости КО в процессе выплавки из неё модельного состава и легко разрушаемый потоком расплава при заливке КО. Попав в рабочее пространство КО, частицы затвердевшей огнеупорной суспензии образуют в отливке засор.

В литье по выплавляемым моделям ЛПС, в основном, состоят из тех же элементов, что и ЛПС в других видах литья, а именно: литниковой воронки (ЛВ) или литниковой чаши (ЛЧ), стояка, коллекторов, прибылей, питателей, зумпфа, выпоров, лит-

никовых ходов, холодильников и др. Независимо от технологии получения отливки, процесс конструирования её ЛПС состоит из следующих этапов:

- анализ требований к качеству литой детали и оценка её технологичности;
- выбор положения отливки в пространстве при заливке;
- назначение места (мест) подвода расплава в отливку;
- назначение на отливке припусков, уклонов, технологических ребер и т.п.;
- выбор типа (конструкции) ЛПС и схемы питания отливки;
- расчёт элементов питания;
- расчёт холодильников;
- расчёт или назначение сечений литниковых каналов;
- расчёт или назначение параметров заливки расплава в КО (форму);
- подбор (по размерам и конфигурации) подходящих элементов ЛПС на которые в цехе уже имеются пресс-формы;

В зависимости от типа ЛПС, конструкции отливки и технологии получения отливки, некоторые вышперечисленные этапы конструирования могут быть совмещены или отсутствовать.

Рассматривая известные способы получения отливок методом литья по выплавляемым моделям, можно выделить два основных признака, предопределяющих конструкции ЛПС. Этими признаками являются – способ заливки КО (заливка под действием гравитации либо под действием других сил, например, центробежных, электромагнитных и т.п.) и условия затвердевания жидкого металла в КО, зависящие от характера отвода тепла от затвердевающей отливки (затвердевание при всестороннем или направленном теплоотводе от кристаллизующегося расплава).

Исходя из этих двух признаков, все известные способы изготовления отливок можно объединить в следующие схемы.

Схема А – заливка расплава в форму под действием гравитации и его последовательное затвердевание в смежных элементах отливки (традиционная технология получения отливок или получение отливок в условиях вакуума, в автоклаве, под поршневым давлением и т. п.).

Схема В – заливка расплава в форму под действием гравитации и его направленная кристаллизация (технологии, реализующие способы направленной кристаллизации отливки).

Схема С – заливка расплава в форму под действием внешней силы и его последовательное затвердевание в смежных элементах отливки (способ центробежного литья, литья с противодавлением, литьё вакуумным всасыванием, литьё с использованием магнетодинамических сил и т. п.).

Схема Д – заливка расплава в форму под действием внешней силы и его направленная кристаллизация (способ центробежного литья с направленной кристаллизацией расплава, регулируемой, например, частотой вращения формы и т. п.).

3.1. Литниково-питающие системы для заливки форм под действием гравитации

В литье по выплавляемым моделям при получении отливок по схеме А (заливка форм под действием гравитации) используют ЛПС самой разнообразной конструкции, что, в отличие от способов изготовления форм по постоянной модели, обусловлено возможностью выполнять ЛПС любой пространственной конфигурации.

Классификация ЛПС, используемых при получении отливок по схеме А, по типу питающего элемента приведена в табл. 3.1 [153].

Тип	Питающий элемент ЛПС	Характеристика питающего элемента
I	Центральный стояк	Коллективный
II	Горизонтальный коллектор	
III	Вертикальный коллектор	
IV	Вертикальный коллектор, заполняемый снизу	Индивидуальный
V	Боковая прилиль	
VI	Верхняя прилиль	Расчленённый
VII	Местная прилиль и коллектор	
VIII	Система местных прилилей	

Рассмотрим особенности конструкций типов ЛПС, указанных в табл. 3.1.

Тип I (Центральный стояк). Область применения — отливки из стали, чугуна, медных, кобальтовых и никелевых сплавов массой до 1 кг, отливки из алюминиевых и магниевых сплавов массой до 0,3 кг. Модельный блок с ЛПС данного типа (см. рис. 3.1,а) представляет собой стояк с ЛВ в верхней части и зумпфом в нижней. На расстоянии 70...90 мм от торца ЛВ по высоте и периметру стояка, на строго определённом расстоянии друг от друга, выполнены питатели, на которых располагают модели отливок.

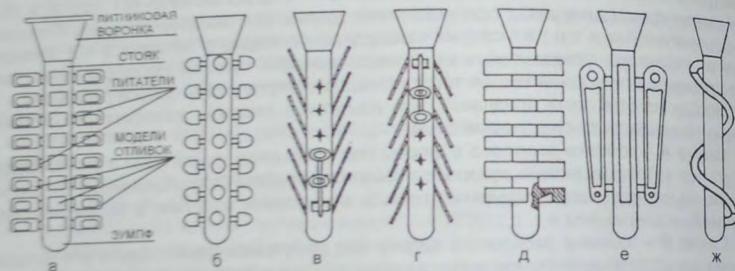


Рис. 3.1. Схемы расположения отливок на стояке (ЛПС типа I)

Данный тип ЛПС используют как при звеньевой сборке модельного блока, так и при сборке (монтаже) модельного блока методом припаивания или приклеивания моделей отливок к стояку.

В ЛПС типа I подвод расплава в отливку, как правило, осуществляется сбоку (см. рис. 3.1,а, б, д). Кроме того, в ЛПС типа I подвод расплава в отливку может быть осуществлён, также, снизу (см. рис. 3.1,в) и сверху (см. рис. 3.1,г).

Используя ЛПС данного типа, получают не только компактные мелкие отливки, но и отливки кольцевого типа (см. рис. 3.1,д), отливки с двумя термическими узлами (см. рис. 3.1,е), а также отливки значительной протяжённости (см. рис. 3.1,ж).

ЛПС данного типа, как правило, не содержат элементов, регулирующих удельный расход металла при заливке. Поэтому процесс заливки сводится к элементарному переливу расплава из ковша в КО (форму) с максимально возможной скоростью.

В данной конструкции ЛПС стояк совмещает функции и литникового хода, и питающего элемента. С точки зрения обеспечения условий питания затвердевающих отливок, ЛПС типа I, из числа всех известных типов ЛПС, наиболее эффективна.

Высокая эффективность данного типа ЛПС объясняется тем, что стояк, как питающий элемент ЛПС, со всех сторон окружён отливками (питаемыми элементами блока). Поэтому при затвердевании тепловод от расплава в стояке осуществляется преимущественно через тело окружающих его отливок, что и обеспечивает последовательность затвердевания расплава в системе отливка—питатель—стояк.

В ЛПС типа I используют стояки, имеющие самую разнообразную форму поперечного сечения. Основные размеры стояков круглого, шести—четырёх — и трёхгранного сечения, используемых в производстве отливок массой до 1 кг из углеродистых сталей и медных сплавов, нормализованы и указаны в ГОСТ 19551-74...ГОСТ 19554-74.

Использование стояков с нормализованными размерами в своё время позволило создать комплексно-механизированный технологический процесс получения мелких отливок, что особенно важно в условиях массового и крупносерийного производства литья.

Из числа ЛПС типа I следует отметить ЛПС с полым стояком (стояк трубчатого типа), схема которого представлена на рис. 3.2. Данную конструкцию стояка преимущественно используют для получения мелких отливок с одним термическим узлом. В отличие от ЛПС со сплошным стояком, ЛПС с полым стояком позволяет получать значительно большее количество отливок при меньшем расходе металла на ЛПС. Например, если использование ЛПС типа I со сплошным стояком обеспечивает выход годного 20...40%, то использование блоков с полым стояком позволяет увеличить выход годного до 50...60%. В настоящее время ЛПС с полым стояком на отечественных предприятиях практически не используют.

При проектировании конструкции модельного блока с ЛПС типа I размещение моделей отливок на стояке следует проводить наиболее плотно, сохраняя при этом расстояние между отливками от 2...3 мм (для мелких тонкостенных отливок) до 8...15 мм (для относительно крупных толстостенных отливок).

Тип II (Горизонтальный коллектор). ЛПС типа II являются модификациями ЛПС типа I. В ЛПС типа II основным питающим элементом отливок является коллектор (см. рис. 3.3,а).

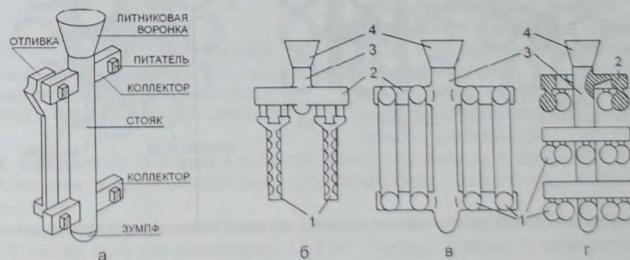


Рис. 3.3. Расположение отливок на ЛПС типа II

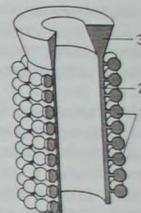


Рис. 3.2. ЛПС с полым стояком (ЛПС типа I):
1 — отливки;
2 — полый стояк;
3 — ЛВ кольцевого типа

Схематичное изображение расположения отливок на ЛПС типа II представлено на рис. 3.3.б...г, где обозначены: 1 – отливки, 2 – коллекторы, 3 – стояки, 4 – литниковые воронки. ЛПС типа II состоит из стояка с ЛВ и горизонтального коллектора с более. Количество горизонтальных коллекторов в блоке – от одного до трех и расположенных, равноудаленных друг от друга, стержней. Количество радиально-в блоке зависит от количества питаемых термических узлов отливки, ее размеров и предельнодопустимой высоты модельного блока. Максимальную высоту модельного блока назначают исходя из соображений удобства его монтажа, прочности модельного блока и КО, обеспечения оптимальных условий сушки огнеупорного покрытия на блоке, габаритных размеров рабочего пространства прокалочной печи, удобства отделения отливок от ЛПС, обеспечения максимального выхода годного и т.п.

Однорядную ЛПС, представленную на рис. 3.3.б, используют для получения протяженных отливок с одним термическим узлом. Для получения протяженных отливок с двумя термическими узлами используют, соответственно, двухрядную ЛПС (см. рис. 3.3.в).

Многорядные ЛПС, также используют для получения мелких компактных отливок с одним термическим узлом, что схематично представлено на рис. 3.3.г.

В питании отливок с ЛПС типа II, как правило, принимают участие и коллектор, и стояк, которые в модельном блоке выполняют функции основных несущих элементов конструкции. Как и у ЛПС типа I, у ЛПС типа II отсутствуют элементы, регулирующие удельную скорость заполнения КО расплавом. Варианты конструкций ЛПС типа II нормализованы и указаны в ГОСТ 19555-74...ГОСТ 19560-74, а также ГОСТ 19562-74.

Как было отмечено выше, при выборе типа ЛПС следует руководствоваться рядом положений, в число которых входит показатель выхода годного. Как правило, выход годного при использовании ЛПС типа II несколько ниже, чем при использовании ЛПС типа I. Тем не менее в некоторых случаях при получении мелких тонкостенных отливок массой до 30...40 г, ЛПС типа II, по сравнению с ЛПС типа I, обеспечивают больший выход годного.

В качестве примера на рис. 3.4 представлены схемы расположения моделей отливок "Кольцо" с толщиной стенки 3 мм, в ЛПС типа I (см. рис. 3.4.а) и ЛПС типа II (см. рис. 3.4.б, в) при звеньевой сборке моделей в блоке.

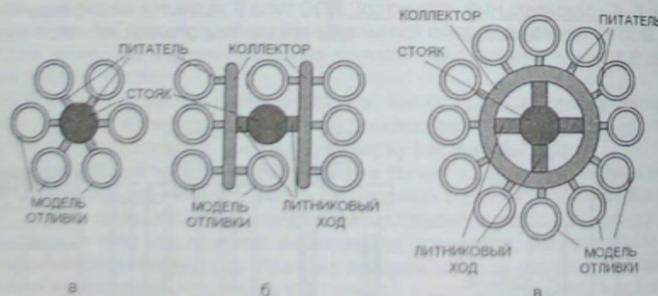


Рис. 3.4. Схемы расположения моделей отливки "Кольцо" в модельном звене

Тип III (Вертикальный коллектор). Принципиальное отличие ЛПС типа III от ЛПС типа II состоит в пространственном расположении коллекторов относительно верти-

кальной оси стояка. На рис. 3.5 представлены схемы модельных блоков с ЛПС типа III, где обозначены: 1 – коллектор, 2 – модель отливки, 3 – питатель, 4 – зумпф.

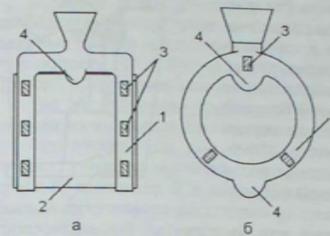


Рис. 3.5. ЛПС типа III

металла при заливке КО в ЛПС данного типа, как правило, отсутствуют. Основные размеры наиболее распространенных ЛПС типа III нормализованы и указаны в ГОСТ 19561-74, ГОСТ 19563-74 и ГОСТ 19565-74.

Тип IV. Вертикальный коллектор, заполняемый снизу. Данный тип ЛПС (см. рис. 3.6) представляет собой, в упрощенном виде, U-образный сосуд.

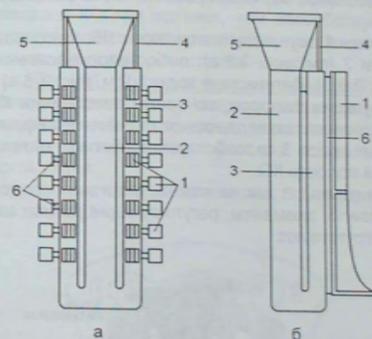


Рис. 3.6. ЛПС в виде вертикального U-образного коллектора (тип IV): 1 – модель отливки; 2 – стояк; 3 – коллектор (обратный стояк); 4 – выпор; 5 – ЛВ; 6 – питатель

Элементы, регулирующие расход металла при заливке КО в ЛПС данного типа, как правило, отсутствуют. Основные размеры наиболее распространенных ЛПС типа III нормализованы и указаны в ГОСТ 19561-74, ГОСТ 19563-74 и ГОСТ 19565-74.

Этот тип ЛПС используют для получения мелких отливок (см. рис. 3.6.а) из сплавов, требующих спокойного и плавного заполнения рабочих полостей КО потоком расплава при заливке. К числу таких сплавов относятся легкоокисляющиеся сплавы (магнитные сплавы, высокохромистые стали, алюминиевая бронза и др.).

В некоторых случаях ЛПС данного типа используют для получения отливок средних размеров относительно простой конфигурации, из легкоокисляющихся сплавов. При этом отливку и коллектор (обратный стояк) сообщают вертикальным щелевым питателем, что схематично представлено на рис. 3.6.б. Применение вертикального щелевого питателя обеспечивает не только плавное поступление расплава в рабочую полость формы, но и улучшает условия питания отливки, а также способствует предупреждению появления в отливке спаев и окисных плён.

Уменьшение в модельном блоке расстояния между стояком и коллектором (обратным стояком) до 5 мм увеличивает эффект последовательного затвердевания в системе отливка-питатель-коллектор. В результате этого сечения коллекторов (обратных стояков) могут быть заметно уменьшены.

Элементы, регулирующие расход металла при заливке КО в ЛПС данного типа, как правило, отсутствуют.

Тип V (Боковая прибыль). Боковая прибыль (см. рис. 3.7), по сути, представляет собой стоек большого сечения и предназначена для получения средне- и крупногабаритных отливок относительно простой конфигурации, в том числе и из сплавов, склонных к пленообразованию в жидком состоянии. Использование массивной боковой прибыли создаёт эффект последовательного затвердевания в направлении тонкая стенка отливки → термический узел отливки → стоек и позволяет получать компактные отливки с относительно низкой величиной усадочной пористости.

Элементы, регулирующие расход металла при заливке КО в ЛПС данного типа, как правило, отсутствуют.

Тип VI (Верхняя прибыль). Данный тип ЛПС представляет собой массивную верхнюю прибыль, установленную над наибольшим массивным (термическим) узлом отливки, что схематично представлено на рис. 3.8.

Верхние прибыли используют для получения средних и крупных отливок в случае, когда невозможно осуществить питание отливки через коллекторы. Более мелкие тепловые узлы отливки питают от массивной верхней прибыли через специальные отводы (литниковые ходы).

В данном типе ЛПС, заполнение отливки 1 осуществляется через ЛВ, выполненную в верхней части массивной прибыли 2 (см. рис. 3.8,а), либо непосредственно через прибыль открытого типа 4 (см. рис. 3.8,б). Литниковые ходы 3 (см. рис. 3.8,а) в данной конструкции ЛПС, выполняют функции выпоров, во время заполнения КО расплавом, и питающего элемента, в процессе затвердевания внешнего бандажа отливки. Кроме этого, наличие литниковых ходов 3 способствует наиболее полному удалению модельного состава из рабочей полости КО.

При данном типе ЛПС заливку форм проводят как из ковша, так и непосредственно из тигла порционной печи. Как правило, элементы, регулирующие расход металла при заливке, в ЛПС данного типа отсутствуют.

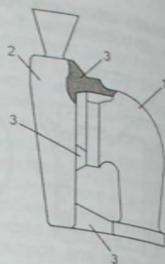


Рис. 3.7. ЛПС типа V:
1 - модель отливки,
2 - стоек; 3 - питатели

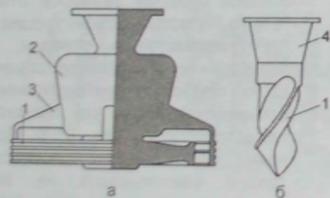


Рис. 3.8. ЛПС типа VI.



Рис. 3.9. Модельный блок отливки "Ротор" с ЛПС типа VI

При использовании модели верхней (центральной) прибыли с металлическим каркасом возможна механизация операций по нанесению и сушке огнеупорного покрытия на модельном блоке. В этом случае основные размеры верхних прибылей,

для отливок из углеродистых и медных сплавов массой более 0,5 кг, регламентирует ГОСТ 19566-74.

С целью предупреждения образования недоливов в отливках и обеспечения свободных выходов газов из быстро заполняемой КО в конструкции некоторых мощных блоков предусматривают выпоры. В этих случаях, выпор сообщает работу "Ротор", представленном на рис. 3.9.

Тип VII (Местная прибыль и коллектор). Пример конструкции ЛПС типа VII с нижним коллектором 2 и верхней прибылью 3 представлен на рис. 3.10.

При заливке (см. рис. 3.10) заполнение полости отливки 1 жидким металлом осуществляется через ЛВ, стоек 5, коллектор 2 и нижний питатель. Верхняя прибыль 3 заполняется расплавом от стоек через верхний, горизонтальный литниковый ход. Удаление воздуха из полости КО во время заливки металлом происходит через выпор 4.

Данный тип ЛПС применяют, в основном, для получения отливок из сплавов, склонных к пленообразованию в жидком состоянии. С целью предупреждения образования усадочных дефектов в стоеке на определенном уровне устанавливают (выполняют) дроссель. Наличие дросселя в стоеке перераспределяет потоки расплава в КО при заливке, чем способствует повышению последовательности затвердевания в направлениях отливка → коллектор и отливка → прибыль.

Тип VIII (Система местных прибылей). Данный тип ЛПС используют преимущественно для получения крупногабаритных фасонных отливок корпусного типа с несколькими компактными или протяжёнными термическими узлами, или одним протяжённым термическим узлом, в условиях единичного и мелкосерийного производства литья.

В качестве примера на рис. 3.11 представлен модельный блок отливки "Аппарат сопловой".

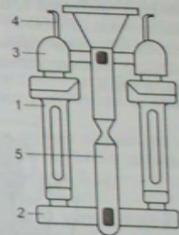


Рис. 3.10. ЛПС типа VII

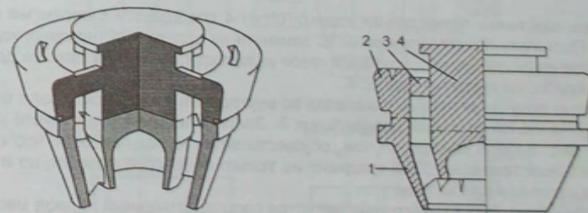


Рис. 3.11. ЛПС типа VIII отливки "Аппарат сопловой"

Данная отливка 1 имеет компактный внутренний и кольцевой наружный тепловые узлы, сообщающиеся между собой тонкостенными лопатками.

Для заливки и питания отливки на внутренний термический узел отливки установлена массивная верхняя центральная прибыль 4 открытого типа. На наружный

кольцевой термический узел установлена верхняя кольцевая прибыль 2. Полости обеих прибылей сообщаются между собой через литниковые ходы 3.

При заливке данная отливка практически полностью заполняется через центральную прибыль. Заполнение полости верхней кольцевой прибыли осуществляется на заключительной стадии заливки КО, от центральной прибыли, через горизонтальные литниковые ходы.

Другим примером ЛПС типа VIII может служить модельный блок отливки "Патрубок", схематично представленный на рис. 3.12.

Согласно рис. 3.12 ЛПС отливки 1 состоит из ЛЧ 9, стояка 4, трёх верхних сегментных прибылей 5, боковой прибыли 7 кольцевого типа, нижней прибыли 2 кольцевого типа. В нижней части стояка имеет металлоприёмную полость 10, сообщающуюся четырьмя горизонтальными литниковыми ходами с нижней кольцевой прибылью 2. Боковая кольцевая прибыль 7 сообщается с полостью стояка через литниковый ход 8.

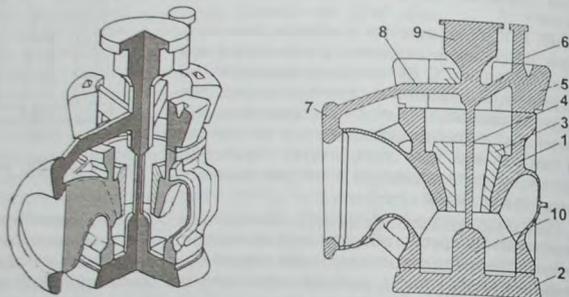


Рис. 3.12. ЛПС типа VIII отливки "Патрубок"

Более короткими литниковыми ходами стояк 4 сообщается с верхними прибылями 5. Поскольку представленная ЛПС замкнута на стояке и литниковых ходах, то для обеспечения свободного удаления газов из полости КО при заливке на одной из верхних прибылей выполнен выпор 6.

С целью получения плотного металла во внутреннем термическом узле отливки, на него установлен стальной холодильник 3. Заполнение полости отливки расплавом (см. рис. 3.12), в данном случае, осуществляется через прибыли, что создает положительный температурный градиент не только по высоте отливки, но и между стенками отливки и прибылями.

Достоинством ЛПС данного типа является рассредоточенный подвод металла в полость отливки, что предотвращает локальный разогрев КО в местах подвода металла в отливку и образование в этих местах отливки усадочных дефектов, рыллот и трещин, обеспечивает хорошую заполняемость КО и существенно сокращает вероятность образования в отливках поверхностных дефектов.

Основным недостатком ЛПС данного типа является сложность их монтажа на модельном блоке и необходимость использования достаточно громоздких стальных или титановых несущих каркасов, а также манипуляторов, для осуществления манипуляций с модельными блоками, выполняемыми в процессе нанесения и сушки на них огнеупорного покрытия, а также транспортировки.

3.2. Элементы литниково-питающих систем

Литниковые воронки (ЛВ) и литниковые чаши (ЛЧ). ЛВ и ЛЧ предназначены для приёма жидкого металла из ковша или печи и его подачи в полость КО (формы). ЛВ небольших размеров используют преимущественно при заливке КО из ковша или плавильной печи с ручным поворотом тигля (плавильные печи открытого типа малой ёмкости).

ЛЧ и ЛВ больших размеров используют при заливке КО из тигля плавильной печи закрытого типа, например вакуумной, где во время заливки происходит значительное смещение траектории истекающей струи расплава из тигля, относительно заливаемой КО (формы). Кроме этого ЛЧ используют и в том случае, когда заливаемая КО имеет большую металлоёмкость и заливается из ковша большой металлоёмкости.

В условиях единичного и серийного производства отливок с ЛПС типа II-VIII используют ЛВ и ЛЧ, конструкция которых, как правило, не регламентирована стандартом.

Конструкции и размеры ЛВ и ЛЧ, используемых для изготовления отливок из углеродистой стали и медных сплавов, регламентированы ГОСТ 19567-74, который предусматривает изготовление ЛЧ (ЛВ) четырёх исполнений (см. рис. 3.13):

- 1 — конические (см. рис. 3.13, исполнение 1);
- 2 — конические, с упрочняющим торцевым буртом (см. рис. 3.13, исполнение 2);
- 3 — конические, с усиленным основанием (см. рис. 3.13, исполнение 3);
- 4 — цилиндрические, с вертикальными ребрами жесткости (см. рис. 3.13, исполнение 4).



Рис. 3.13. Схемы конструкций моделей ЛВ

Основные размеры моделей ЛЧ (ЛВ) в соответствии с ГОСТ 19567-74, представленных на рис. 3.13, приведены в табл. 3.2.

Размеры литниковых воронок (чаш)

Таблица 3.2

Обозначения литниковых воронок (чаш) исполнения (см. рис.3.13)				Размеры, мм					
Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 4	D	D ₁	H	H ₁	r	r ₁
1	2	3	4	25	40	40	45	10-16	5-8
5	6	7	8	28	50				
9	10	11	12	30	60				
13	14	15	16	32	50				
17	18	19	20	34	60	50	55	10-16	5-8
21	22	23	24		70				
25	26	27	28	36	60	60	70	10-16	5-8
29	30	31	32		70				
33	34	35	36	38	60	60	70	10-16	5-8
37	38	39	40		70				
41	42	43	44	40	60	60	70	10-16	5-8
45	46	47	48		70				
49	50	51	52	40	80	60	65	10-16	5-8
53	54	55	56		60				
57	58	59	60	45	70	70	75	12-20	6-10
61	62	63	64		80				
65	66	67	68	45	70	80	85	12-20	6-10
69	70	71	72		80				
73	74	75	76	50	90	80	95	12-20	6-10
77	78	79	80		100				
81	82	83	84	56	90	90	95	12-20	6-10
85	86	87	88		100				
89	90	91	92	56	110	90	95	12-20	6-10
93	94	95	96		110				

Примечание. Пример условного обозначения ЛВ с размерами D₁=60, H=50, исполнения 3. Чаша 43 ГОСТ 19567-74.

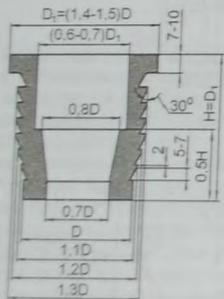


Рис. 3.14. Модель ЛЧ

Стандартом также предусмотрено использование ЛЧ с кольцевыми утолщениями (горизонтальными ребрами жёсткости). Схема модели ЛЧ с горизонтальными ребрами жёсткости представлена на рис. 3.14.

Рассматривая конструкцию ЛЧ, представленную на рис. 3.14, следует отметить её существенный недостаток – наличие острых внутренних кромок, что, при недостаточно высокой прочности КО, может привести к их скалыванию как в процессе прокаливания КО, так и в момент заливки металла в КО. В свою очередь, скалывание частиц КО со стороны её рабочей полости может привести к засору отливки.

Конструктивно ЛВ представляет собой открытую с торца резко сужающуюся к низу полость в КО (форме), переходящую в стожок. Коническая форма ЛВ (см. рис. 3.13, исполнение 1) была наиболее широко распространена в единичном и мелкосерийном производстве мелкого и среднего литья. Конструкция данной ЛВ наиболее проста в исполнении, однако, при недостаточно высокой прочности КО в ЛВ образуются трещины. Трещины могут образовываться как в период

выплавления модельного состава из КО, так и во время её прокаливания. Наличие трещин в ЛВ приводит не только к её частичному или полному разрушению, но и является причиной появления засора в отливках.

Во избежание образования торцевых трещин в ЛВ рекомендуется использовать конструкцию конической ЛВ с упрочняющим торцевым буртом (см. рис. 3.13, исполнение 2), который формируется в процессе нанесения огнеупорного покрытия на модельный блок. Наличие бурта существенно уменьшает вероятность образования торцевых трещин в ЛВ и появления, по этой причине, засора в отливке (отливках).

Конические ЛВ с усиленным основанием (см. рис. 3.13, исполнение 3) применяются в том случае, когда массивные модели отливок в модельном блоке достаточно близко расположены к основанию ЛВ. В этом случае ЛВ выполняет роль прибыли для близлежащих под ней отливок.

Конструкции моделей ЛВ и ЛЧ, представленные на рис. 3.13 (исполнение 4) и рис. 3.14, обеспечивают КО повышенную жёсткость и конструкционную прочность. Указанные конструкции ЛВ и ЛЧ применяются в тех случаях, когда КО обладает недостаточной прочностью и термостойкостью. Кроме того, представленная на рис. 3.14 конструкция модели ЛЧ, используется при большой металлоёмкости КО.

Помимо указанных конфигураций ЛВ и ЛЧ, в литье по выплавляемым моделям достаточно широко используют и другие виды и конструкции металлоприёмников, например, конструктивно совмещая исполнения 2 и 4, представленные на рис. 3.13. То есть, например, ЛВ выполняют конической формы с торцевым буртом и вертикальными ребрами жёсткости. Кроме этого для средних и крупных отливок, заливаемых в вакуумных печах, используют ЛВ, имеющих в плане не только круглую, но и прямоугольную форму.

При всех прочих равных условиях конструкционная и термическая прочность ЛВ и ЛЧ зависит от способа формирования их торцевой поверхности. Дело в том, что, при нанесении огнеупорного покрытия на модельный блок, тело КО формируется и на торцевой поверхности ЛВ (ЛЧ). Для обеспечения удаления модельного состава из КО и для её заливки металлом торцевая часть ЛВ (ЛЧ) должна быть свободна от огнеупорного покрытия. С этой целью огнеупорное покрытие с торцевой части ЛВ (ЛЧ) удаляют.

Удаление огнеупорного покрытия с торца ЛВ (ЛЧ) проводят либо по окончании изготовления КО – путём её подрезки по периметру торца ЛВ (ЛЧ) абразивным кругом на отрезном станке, либо непосредственно после нанесения каждого очередного слоя огнеупорной суспензии на модельный блок – путём зачистки ножом по торцу ЛВ (ЛЧ). С точки зрения предупреждения образования трещин, подрезка КО абразивным кругом является наиболее нежелательным способом. В этом отношении более благоприятным является способ, предусматривающий зачистку торца ЛВ (ЛЧ) от огнеупорной суспензии после нанесения каждого очередного её слоя на модельный блок.

Для реализации данного способа верхняя часть модели ЛВ или ЛЧ должна иметь бурт, что схематично представлено на рис. 3.13 (исполнение 2) и рис. 3.15. Согласно рис. 3.15,а, для создания необходимых условий очистки торца ЛВ от огнеупорной суспензии конструкция каркаса стояка выполнена таким образом, что при сборке торцевая часть модели ЛВ в модельном блоке упирается в стальной диск 4, закреплённый на каркасе стояка 1, причём диаметр стального диска и бурта ЛВ – одинаковы. На рис. 3.15,г аналогичный стальной диск 5 толщиной 1,5...2,5 мм выполнен заедно с моделью ЛВ 2 и в натяг насажен на каркас стояка 1. Диаметр стального диска на 10...20 мм больше диаметра бурта ЛВ.

В том и другом случае, в процессе изготовления КО, с торца стальных дисков, удаляют (счищают) каждый очередной слой огнеупорного покрытия (непосредствен-

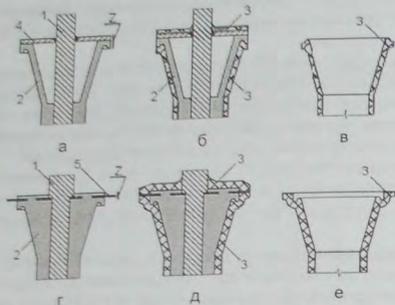


Рис. 3.15. Схемы этапов выполнения литниковых воронок в КО

никелевых сплавов, заливаемых в вакуумных использующих чаши, вид которых представлен на рис. 3.16, отсутствуют ребра жесткости, поскольку прочность, термостойкость и достаточно большая толщина используемых КО обеспечивают надёжную работу ЛЧ и её целостность. С целью снижения вероятности появления в отливках дефектов засорного типа, торцы ЛЧ и ЛВ выполняют с одним из профилей бурта, представленных на рис. 3.17, где буквой Z обозначена поверхность реза КО абразивным кругом или поверхностью, с которой в процессе нанесения огнеупорного покрытия на модельный блок регулярно удаляют огнеупорную суспензию.

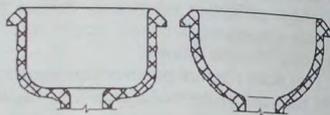


Рис. 3.16. Разрез литниковых чаш КО

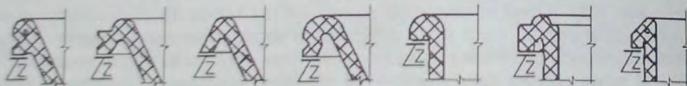


Рис. 3.17. Схемы выполнения бурта ЛВ и ЛЧ

Стояки, коллекторы и питатели. В литье по выплавляемым моделям стояки, коллекторы и питатели участвуют не только в подводе металла в полость КО отливки, но и в питании затвердевающей отливки. Кроме того, эти элементы ЛПС модельного блока несут основную механическую нагрузку в процессе манипуляций с модельным блоком и при изготовлении КО, поскольку удерживание модельного блока при изготовлении КО, как правило, осуществляют за стояк.

Стояк – вертикальный канал, соединяющий ЛВ или ЛЧ с последующими элементами ЛПС. Стояки выполняют с круглым, квадратным, прямоугольным, треугольным, шестигранным, а в некоторых случаях с П- или Z-образным сечением. При этом стояки могут иметь по высоте постоянное или переменное сечение.

Для ЛПС типа I... III ГОСТ 19551-74...ГОСТ 19554-74 предусматривает использование прямых и конусных стояков круглого, шестигранного, квадратного или тре-

угольного сечения, диаметром от 24 до 56 мм и длиной от 100 до 400 мм, что схематично представлено на рис. 3.18.

но после обсыпки блока зернистым огнеупорным материалом, до начала сушки). Поверхность торца стального диска в верхней части ЛВ, с которой проводят удаление огнеупорной суспензии, на рис. 3.15, и рис. 3.15,г обозначена буквой Z. В результате проведения данной технологической операции, к моменту окончания нанесения огнеупорного покрытия З, КО на торце ЛВ будет отсутствовать (см. рис. 3.15,б, д), а после выплавления из блока модельного состава, КО в области ЛВ будет иметь вид, соответствующий рис. 3.15,в или рис. 3.15,е.

В ЛПС, используемых для получения отливок из жаропрочных плавильно-заливочных установках,

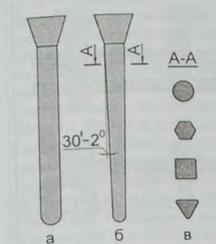


Рис. 3.18. Виды прямого (а), конусного (б) стояка и их сечений (в)

Прямые стояки (см. рис. 3.18,а) круглого сечения используют при секционной (звеньевой) и индивидуальной сборке модельных блоков. Стояки круглого сечения (см. рис. 3.18,б) конической формы, а также прямые и конические стояки с сечением, отличным от круглого, используют только для индивидуальной сборки модельных блоков.

Коллекторы – каналы ЛПС, соединяющие стояк с питателем (питателями) отливки и выполняющие функции питающих элементов отливки в отсутствие прилилей. Форму коллекторов и их размещение на стояке определяют исходя из положения отливки в модельном блоке, конфигурации отливки и расположения на ней термических узлов. Для ЛПС, используемых при получении мелких и средних отливок, конструкции коллекторов нормализованы. Краткая характеристика конструкций коллекторов приведена в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Краткая характеристика конструкций коллекторов

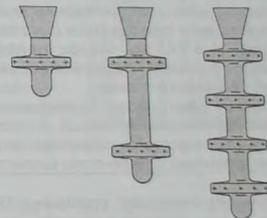
Тип коллектора, краткая характеристика, общий вид

Тип – горизонтальный, дисковый (ГОСТ 19555-74)

Имеет от одного и более ярусов коллекторов дискового типа, расположенных на стояке горизонтально, параллельно друг другу.

Область применения – мелкие протяжённые отливки небольших поперечных размеров с одним или двумя питаемыми от коллекторов массивными (термическими) узлами.

Модели отливок располагают симметрично на цилиндрических поверхностях дисков коллекторов, вертикально или с небольшим наклоном относительно оси стояка.

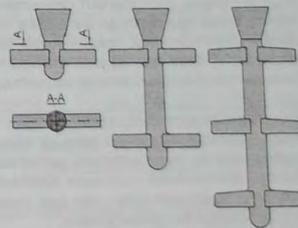


Тип – горизонтальный, радиальный, по 2 в звене (ГОСТ 19556-74)

Имеет от одного и более ярусов коллекторов, расположенных на стояке, радиально, горизонтально, попарно, на одной горизонтальной оси, параллельно между собой.

Область применения – мелкие, плоские, протяжённые отливки с одним питаемым от коллектора массивным (термическим) узлом, расположенным на торцевой части отливки. Многоярусную систему используют для получения очень мелких отливок с одним массивным (термическим) узлом или для получения более крупных отливок с двумя массивными (термическими) узлами.

Модели отливок располагают симметрично на нижних или двух боковых поверхностях граней коллекторов, вертикально или горизонтально относительно оси стояка.



Тип – горизонтальный, радиальный, по 3, 4 или 5 в звене

(ГОСТ 19557-74...ГОСТ 19559-74). Имеет различное число ярусов. Коллекторы в ярусе расположены радиально, горизонтально и равноудалены друг от друга (звездообразно). Область применения: одноярусные преимущественно применяют для изготовления протяженных отливок коробчатого типа с одним массивным (термическим) узлом, расположенным в торцевой части отливки. Двухъярусные – для изготовления отливок коробчатого или корпусного типа, с одним или двумя массивными (термическими) узлами, расположенными в верхней и нижней части отливки. Многоярусные – для изготовления отливок коробчатого или корпусного типа, небольших размеров, с одним массивным (термическим) узлом в торцевой части отливки.

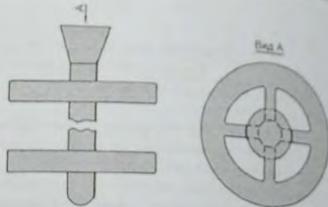
Модели отливок располагают симметрично горизонтально, на торцевых нижних или боковых гранях коллекторов.

Тип – горизонтальный, кольцевой

(ГОСТ 19560-74). Имеет один или два яруса коллекторов кольцевого типа, расположенных на стойке горизонтально, параллельно между собой.

Область применения – отливки сравнительно небольшой протяженности и узкого поперечного сечения (типа рычагов, кронштейнов и т.п.) или плоских отливок с одним массивным (термическим) узлом в торцевой части отливки.

Модели располагают симметрично на нижней поверхности кольца. В некоторых случаях допускается симметричное расположение моделей как на нижних, так и на верхних кольцевых поверхностях коллекторов.

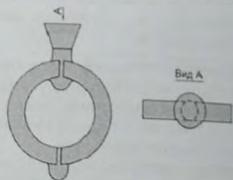


Тип – вертикальный, кольцевой (ГОСТ 19561-74)

Имеет один вертикальный коллектор кольцевого типа. В нижней части коллектора выполнен зумпф.

Область применения – отливки кольцевого типа.

Модели отливок располагают симметрично, по две штуки в блоке при подводе металла в отливку через два и более питателя, соединяющих центральный массивный (термический) узел отливки с наружной боковой поверхностью кольца коллектора.

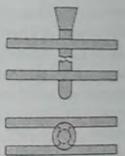


Тип – горизонтальный, незамкнутый, парный (ГОСТ 19562-74)

Имеет один или два яруса звеньев коллекторов, расположенных на стойке попарно, горизонтально, параллельно между собой.

Область применения – отливки плоского типа с узким поперечным сечением, имеющие один или два массивных (термических) узла, расположенных на одном уровне.

Модели располагают симметрично, вертикально в один или два яруса, на нижних гранях коллектора, если отливка имеет один массивный (термический) узел, и на наружных боковых гранях коллекторов, если в отливке два массивных (термических) узла.



Тип – вертикальный, незамкнутый, парный

(ГОСТ 19563-74)

Имеет два вертикальных, параллельных между собой, коллектора, расположенных вертикально под стоком. Область применения – мелкие отливки различной формы, конфигурация которых обеспечивает наиболее технологичное консольное их положение в блоке и компактное расположение на вертикальных коллекторах.

Модели отливок располагают симметрично, горизонтально, на одном коллекторе три одно массивном (термическом) узле отливки и на двух коллекторах если подвод металла в отливку осуществляется через два питателя, соединяющих отливку с передними и задними гранями коллекторов.

Тип – вертикальный, замкнутый, парный (ГОСТ 19564-74)

Имеет два протяженных, вертикальных коллектора с сечением в форме квадрата, выполненных в одной вертикальной плоскости со стоком.

Область применения – небольшие плоские отливки различной конфигурации, форма которых обеспечивает наиболее технологичное консольное их положение в блоке и компактное расположение на вертикальных поверхностях коллекторов.

Модели отливок располагают симметрично, горизонтально, на каждом коллекторе, на его внешних боковых гранях.

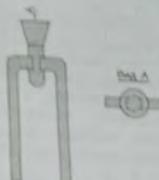
Тип – вертикальный, замкнутый, двухпарный (ГОСТ 19565-74)

Имеет четыре протяженных, вертикальных коллектора с сечением в форме квадрата, выполненных в одной вертикальной плоскости со стоком.

Область применения – небольшие плоские отливки различной конфигурации, форма которых обеспечивает наиболее технологичное консольное их положение в блоке и компактное расположение на вертикальных поверхностях коллекторов.

Модели отливок располагают симметрично, горизонтально, на каждом коллекторе, на его внешних боковых гранях.

Окончание табл. 3.3



Уклоны на моделях ЛПС должны соответствовать ГОСТ 3212-92. При этом в пределах указанных отклонений размеров элементов ЛПС могут быть выполнены уклоны, обеспечивающие наиболее рациональные условия размещения моделей отливок в модельном блоке.

Острые кромки элементов литниковых систем, согласно ГОСТ 19568-74, следует скруглить, обеспечив при этом радиус скругления не менее 2 мм. Радиусы сопряжений элементов коллекторов со стояком (галтели) должны быть в пределах от 2 до 5 мм.

Питатели – короткие литниковые ходы (длиной 4...15 мм и более) ЛПС, соединяющие отливку с питающим элементом ЛПС (стояком, коллектором). Конструкции питателей, применяемых для получения отливок массой до 1 кг из углеродистых марок сталей и медных сплавов в ЛПС типа I...III, регламентированы ГОСТ 19551-74, и схематично представлены на рис. 3.19.

ГОСТ 19551-74 предусматривает выполнение питателей без пережима (см. рис. 3.19, а, г) и с поперечным пережимом (см. рис. 3.19, б, в, д, е), расположенным ближе к отливке. Наличие пережима на питателе определяется способом отделения отливки от ЛПС (питателя). В частности, пережим на питателе следует выполнять в обязательном порядке для отливок, отделяемых от питателя путём отламывания, при достаточно большой площади поперечного сечения питателя.

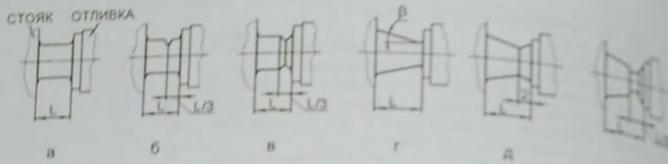


Рис. 3.19. Схемы питателей (ГОСТ 19551-74)

Пережимы на питателях выполняют П- или V-образной формы. Глубина пережима принимают, как правило, в пределах от 2 до 5 мм. Если питатель имеет квадратное или прямоугольное сечение, то пережим выполняют односторонним (см. рис. 3.19, б) со стороны питателя, по отношению к которой, нагрузка, приложенная к отливке, в момент её отделения от питателя, будет действовать перпендикулярно к ряду случаев пережим выполняют кольцевым по всему периметру сечения питателя (см. рис. 3.19, в, д, е).

В месте сопряжения отливки и питателя выполняют галтель радиусом не менее 1 мм, сопряжение питателя со стояком или коллектором оформляют галтелью радиусом не менее 2 мм.

Для улучшения условий питания отливки или по конструктивным соображениям питатель придают коническую форму. При этом поперечное сечение питателя непрерывно увеличивается в направлении от отливки к стояку (коллектору). Использование питателя конической формы (см. рис. 3.19, г, д, е) позволяет увеличить его длину без ухудшения условий питания отливки в процессе её затвердевания. Величина допустимого увеличения длины питателя (в %) от угла его конусности (β) приведена в табл. 3.4.

Таблица 3.4
Величина допустимого увеличения длины питателя (%) от угла его конусности (β)

Угол конусности питателя (β), град	5	10	15	20
Максимальное увеличение длины питателя, %	20	30	40	50

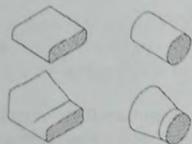


Рис. 3.20. Схемы конструкций питателей большого поперечного сечения

Питатели без пережима используют в тех случаях, когда они имеют либо чрезмерно малые площади поперечного сечения, либо в случае, когда отливку отделяют от ЛПС путём отрезки, например, абразивным кругом.

Наиболее распространенные формы питателей без пережима, используемые для ЛПС типа IV...VIII, представлены на рис. 3.20. Размеры и форма питателей для отливок с ЛПС типа IV...VIII не регламентированы. Если питатель имеет форму усечённой пирамиды или конуса для улучшения условий отрезки отливок от ЛПС торцевую часть конических питателей (протяжённостью 2...7 мм), примыкающую к отливке, выполняют с постоянным поперечным сечением.

Зумпфы. Зумпф является туловой частью стояка и предназначен не только для создания металлостатического напора в стояке, но и улавливания случайных частиц, попавших в стояк, а также для обеспечения спокойного поступления распла-

ва сплошным потоком из стояка в прилегающие к нему литниковые ходы. Некоторые конструкции зумпфов представлены на рис. 3.21.

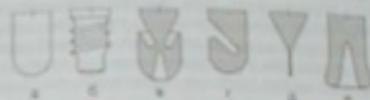


Рис. 3.21. Схемы конструкций зумпфов

завенной сборки модельного блока, зумпф данной конструкции выполняют функцией замка, удерживающего звенья на металлическом каркасе и прижимающего их друг к другу.

На автоматических линиях нанесения, сушки огнеупорного покрытия и выплавки модельного состава из КО в ЛПС типа I зумпф выполняет функцию замка, удерживающего на каркасе не только звенья моделей, но и КО, после выплавки из неё модельного состава. Для этого внешняя цилиндрическая поверхность зумпфа имеет резьбу с крупным шагом (см. рис. 3.21, б), а в качестве модели зумпфа используют металлический насадок аналогичного профиля, покрываемый тонким слоем модельного состава после сборки модельного блока.

Зумпфы определённой конструкции, в КО выполняют функции соросборников, предотвращая появление в отливках зазоров. Разрезы моделей таких зумпфов показаны на рис. 3.21, в, г, д [326].

С точки зрения надёжности удерживания в полости зумпфа инородных частиц (осколки КО, частицы песка и т.п.), попавших в КО извне через ЛВ (ЛЧ), по результатам исследований, проведенных автором, наибольшей надёжностью обладает зумпф, схема разреза модели которого представлена на рис. 3.21, в.

Зумпф, разрез модели которого представлен на рис. 3.21, е, применяют при получении отливок из легкоокисляющихся сплавов. Данная конструкция зумпфа уменьшает вероятность вспенивания и значительного разбрызгивания первых порций поступающего в КО расплава, что способствует снижению вероятности образования королек и окисных плёнок, наиболее часто встречающихся в отливке в области питателя.

Прибыли. В литье по выплавляемым моделям, прибыли, как самостоятельный элемент ЛПС, используют только для отливок с ЛПС типа VI...VIII, то есть для средних и крупных отливок.

Прибыль – питающий отливку элемент ЛПС, устанавливаемый на массивный (термический) узел отливки или её стенку. Соответственно, для обеспечения подпитки отливки жидким металлом из прибыли в течение всего периода затвердевания отливки, расплав в прибыли должен затвердевать в последнюю очередь, а его количество в прибыли должно быть достаточным для компенсации усадки затвердевающего расплава в отливке. В частности, работу прибыли можно считать удовлетворительной, если положение фронта кристаллизации расплава в отливке через равные промежутки времени ($t_0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_4$) с момента начала кристаллизации (t_0), и расположение усадочных полостей в прибыли в момент времени (t_4) будут соответствовать схеме, представленной на рис. 3.22, где обозначены: 1 – отливка, 2 – прибыль, 3 – усадочная раковина, 4 – вторичная усадочная раковина.

С отливкой прибыль сообщается коротким литниковым ходом большого сечения, называемым шейкой прибыли. Как правило, сечение шейки прибыли должно быть не меньше или незначительно меньше диаметра окружности, вписанной в