

Министерство образования и науки Российской Федерации

---

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПЕТРА ВЕЛИКОГО

---

Г.Ф. Шеметев

**Учебное пособие по курсу**  
**ПРОИЗВОДСТВО ОТЛИВОК ИЗ СПЛАВОВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ**  
**Производство отливок из магниевых сплавов**

Санкт-Петербург

2017

## Оглавление

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....   | 4  |
| ГЛАВА I. ЛИТЕЙНЫЕ СПЛАВЫ НА МАГНИЕВОЙ ОСНОВЕ .....  | 6  |
| 1.1. Получение магния.....  | 6  |
| 1.2. Физико-химические свойства магния.....   | 8  |
| 1.3. Легирующий комплекс и группы литейных магниевых сплавов ...  | 11 |
| 1.4. Составы и свойства сплавов системы Mg - Al - Zn .....  | 13 |
| 1.5. Модифицирование сплавов Mg - Al - Zn.....  | 17 |
| 1.6. Высокопрочные сплавы системы Mg - Zn - Zr .....  | 21 |
| 1.7. Жаропрочные литейные магниевые сплавы .....  | 25 |
| 1.8. Технологические свойства литейных магниевых сплавов.....   | 31 |
| ГЛАВА II. ПЛАВКА МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ .....  | 34 |
| 2.1. Печи для плавки магниевых сплавов и плавильный инструмент...   | 34 |
| 2.2. Шихтовые материалы.....  | 44 |
| 2.3. Флюсы для плавки магниевых сплавов.....  | 45 |
| 2.4. Технологический процесс флюсовой плавки.....   | 50 |
| 2.5. Разливка сплавов.....  | 51 |
| 2.6. Бесфлюсовая плавка магниевых сплавов .....   | 54 |
| ГЛАВА III. ФОРМОВОЧНЫЕ И СТЕРЖНЕВЫЕ СМЕСИ.....  | 56 |
| 3.1. Защитное влияние присадки ВМ и составы формовочных смесей .....  | 58 |
| 3.2. Составы стержневых смесей.....   | 61 |
| ГЛАВА IV. ЛИТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ, ПРИБЫЛИ И ХОЛОДИЛЬНИКИ.....   | 64 |
| 4.1. Течение расплава в литниковой системе и форме. Конструктивные особенности элементов литниковой системы ..... | 65 |
| 4.2. Типы литниковых систем.....  | 71 |
| 4.3. Расчет элементов литниковой системы.....   | 76 |
| 4.4. Прибыли для отливок из магниевых сплавов .....   | 82 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.5. Холодильники .....  | 87  |
| ГЛАВА V. ЛИТЬЕ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ В КОКИЛЬ И ПОД ДАВЛЕНИЕМ.....                               | 89  |
| 5.1. Требования к отливкам для кокильного литья .....  | 90  |
| 5.2. Литниково-вентиляционные системы, применяемые для литья магниевых сплавов в кокиль..... | 92  |
| 5.3. Подготовка кокилей и заливка металла.....   | 94  |
| 5.4. Особенности литья магниевых сплавов под давлением .....                                 | 99  |
| ПРИЛОЖЕНИЕ. Меры противопожарной безопасности при работе с магниевыми сплавами.....          | 103 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....  | 105 |

## ВВЕДЕНИЕ

Магниевого сплавы относятся к числу конструкционных материалов, которые находят все большее применение в различных областях техники, начиная с авиакосмического аппаратостроения до легкой и пищевой промышленности.

Это объясняется, прежде всего, их малой плотностью, высокой удельной прочностью, способностью поглощать энергию удара и вибрационных колебаний, отличной обрабатываемостью резанием.

В настоящее время состояние технологических процессов достигло того уровня, который позволяет получать изделия из магниевых сплавов различной сложности и габаритов методами фасонного литья и пластической деформации.

Из магниевых сплавов изготавливают многие детали современных самолетов и вертолетов, в том числе и детали двигателей. Применяются эти сплавы и в ракетах, и в спутниках. Обладая сравнительно высокой теплоемкостью (почти в 2,5 раза более высокой, чем у стали), они нагреваются медленнее, чем сталь. Поэтому в кратковременно работающих ракетах (типа «воздух – воздух») масса деталей из магниевых сплавов составляет до 90%. Применение магниевых сплавов в конструкциях ракет позволяет снизить их массу на 20-30%, увеличить грузоподъемность и дальность полета.

Возрастающее применение магниевых сплавов обусловлено также большими сырьевыми ресурсами магния, который относится к числу элементов, наиболее распространенных в природе. Содержание его в земной коре составляет 2,4%. По этому показателю он уступает только алюминию и железу. При этом магний образует удобные для разработки рудные месторождения. Особенно много его в магнезитах и доломитах. Из последнего состоят целые горные хребты. Кроме земных ресурсов практически неисчерпаемым источником запасов магния являются воды Ми-

рового океана. Из  $5 \cdot 10^{16}$  тонн растворенных в воде веществ на долю магния приходится примерно  $1,85 \cdot 10^{15}$  тонн (в каждом литре воды содержится 3,8 грамма хлористого магния). Уже работают заводы, добывающие магний из морской воды. Даже в растительных организмах содержание магния, который является ядром молекулы хлорофилла, оценивается в 100 млрд. тонн.

Высокий уровень свойств магниевых сплавов обеспечивается не только составом, но и организацией технологического процесса плавки и литья.

## ГЛАВА I. ЛИТЕЙНЫЕ СПЛАВЫ НА МАГНИЕВОЙ ОСНОВЕ

Прежде чем рассмотреть составы и свойства сплавов магния, следует кратко ознакомиться с методами получения магния, которые определяют возможные примеси в нем, а также с основными физико-химическими свойствами, которые оказывают существенное влияние на выбор литейной технологии.

### 1.1. Получение магния

История получения чистого магния навсегда связана с именами англичанина Гемфри Деви и французов Бусси, Сент-Клер Девиля и Карона.

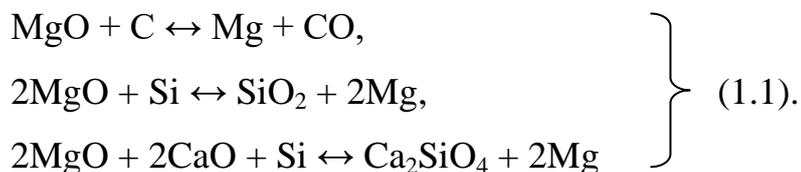
В 1808 году Гемфри Деви при электролизе белого порошка магнезии с окисью ртути получил амальгаму нового металла, который вскоре был из нее выделен и назван магнием. Своим названием он обязан тому, что такой же порошок, который использовал Гемфри Деви, получался при прокаливании минерала, найденного в окрестностях греческого города Магнезии. Магний, выделенный Деви, был сильно загрязнен; первый действительно чистый магний был получен в 1829 году Бусси. В дальнейшем Сент-Клер Девиль и Карон получили магний путем восстановления расплавленного хлористого магния металлическим натрием. В дальнейшем промышленное производство магния производилось электролитическим методом.

В нашей стране первые опыты по производству магния были проведены в 1914-1915 годах в Петербургском политехническом институте П. П. Федотьевым и К. Н. Ворониным. Видную роль в становлении электролитического получения магния сыграли работы металлургов-политехников П. П. Федотьева, Ю. В. Баймакова и других.

Исходным сырьем для получения магния служат такие природные минералы, как карналлит ( $MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6H_2O$ ), магнезит ( $MgCO_3$ ) или доло-

мит ( $\text{MgCO} \cdot \text{CaCO}$ ).

Из магнезита и доломита магний можно выделить карботермическим или силикотермическим способом:



Реакции протекают при температурах, превышающих температуру кипения магния, поэтому он легко удаляется в виде пара из зоны реакции, а затем конденсируется. Поэтому реакции проходят практически вправо до конца.

Однако, основную массу магния получают электролитическим способом из хлористого магния.

По одной схеме обезвоженный карналлит загружают в электролизные ванны, в которых хлорид магния разлагается на магний и хлор. По другой схеме обожженный магнезит смешивают с углем и брикетируют. Брикетты хлорируют в электропечах шахтного типа. Полученный таким путем расплавленный безводный хлорид магния загружают в электролизеры, в которых он разлагается на магний и хлор. Для получения более легкоплавкого, обладающего благоприятной плотностью, электропроводностью и вязкостью электролита, к хлористому магнию добавляют хлориды калия, натрия и кальция.

Магний-сырец, извлеченный из электролизера вакуум-ковшом, перевозится в отделение рафинирования, где он очищается от примесей, которые делятся на 2 группы:

Металлические, попадающие в магний вследствие электролитического разложения загрязнений, содержащихся в исходном сырье и компонентах флюсов.

Неметаллические, механически захватываемые при извлечении магния из электролизной ванны.

Рафинирование может осуществляться несколькими способами: электролитическим, отстаиванием или промывкой флюсами, введением таких присадок, как цирконий, марганец, титан, возгонкой в вакууме или зонной плавкой. Рафинирование путем отстаивания и промывки флюсами позволяет избавиться от примесей второго типа, таких как  $MgCl_2$ ,  $KCl$ ,  $NaCl$ ,  $CaCl_2$  и  $MgO$ . Применение остальных способов рафинирования позволяет уменьшить содержание металлических примесей. Они сильно снижают коррозионную стойкость, особенно в морской среде, причем наиболее вредное влияние оказывает никель. Наиболее высокая коррозионная стойкость достигается, когда остаточное содержание примесей не превышает: никель – 0,003%, медь – 0,016%, кремний – 0,062%. Никель легко растворяется в расплавленном магнии. По этой причине не следует плавить магниевые сплавы в чугунных или стальных тиглях, имеющих в составе никель.

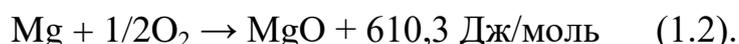
В соответствии с ГОСТ 804-93 «Магний первичный в чушках. Технические условия» выпускается 3 марки первичного магния: Мг 96, Мг 90 и Мг 80. Марка обозначает содержание магния сверх 99%. Например, в марке Мг 90 содержание магния составляет 99,90%, суммарное содержание примесей – не более 0,1%.

В литейные цехи магний поступает в виде чушек массой  $(8 \pm 1)$  кг.

## 1.2. Физико-химические свойства магния

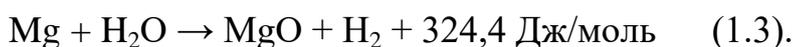
1. Магний – металл серебристо-белого цвета, имеющий гексагональную плотноупакованную решетку ( $a = 3,21A^0$ ,  $c = 5,21A^0$ ). При обычных условиях поверхность металла, хранящегося в сухом помещении, покрыта прочной защитной пленкой  $MgO$ , которая при нагреве разрушается, теряет свои защитные свойства, скорость окисления возрастает.

Окисление протекает с выделением большого количества тепла:



Выделяющаяся теплота нагревает металл, скорость окисления возрастает и в итоге при температуре около 600° С магний загорается.

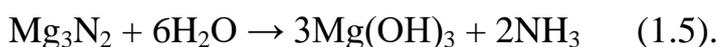
Температура самовоспламенения магния (максимальная температура, при которой магний еще не горит при очень больших выдержках) зависит от физического состояния и уменьшается с уменьшением крупности магния. Например, она увеличивается от 450° С (для порошкового магния) до 600° С (для кускового). Так же интенсивно протекает реакция с водой:



Загоревшийся магний нельзя потушить водой. Магний взаимодействует с азотом:



Нитрид магния разлагается парами воды:



Происходит взаимодействие с двуокисью и окисью углерода и сернистым газом по реакциям:



Последняя реакция при температурах плавки протекает медленно, поэтому сернистый газ используют в качестве защитного при разливке магниевых сплавов.

2. Отличительной особенностью магния является его малая плотность. При 20° С она равняется 1740 кг/м<sup>3</sup>, что в 5 раз легче меди, в 4,5 раза легче железа. Даже алюминий, который тоже относится к легким металлам, в 1,5 раза тяжелее его.

Это свойство магния обеспечивает сплавам высокую удельную прочность (относительная прочность на единицу массы) и, следовательно, широкое использование их в аэрокосмическом комплексе, в транспорт-

ном машиностроении и изделиях бытового назначения.

3. Температура плавления магния равняется  $650^{\circ}\text{C}$ , что позволяет использовать для приготовления расплава в фасонолитейных цехах тигельные печи сопротивления или индукционного нагрева.

4. В то же время магний имеет достаточно низкую температуру кипения, равную  $1107^{\circ}\text{C}$  и высокую упругость паров не только в жидком, но даже и в твердом состоянии, о чем свидетельствуют приведенные ниже данные:

|                                 |      |      |      |      |      |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|
| Температура, $^{\circ}\text{C}$ | 621  | 651  | 702  | 909  | 1034 |
| Упругость паров, кПа            | 0,13 | 0,33 | 0,66 | 13,3 | 53,3 |

Это обстоятельство исключает плавку магния и его сплавов в вакуумных печах, но дает возможность осуществлять рафинирование магния путем возгонки в вакууме при остаточном давлении 13-26 Па.

5. Теплота плавления магния и его теплоемкость, отнесенные к единице массы, несколько ниже, чем у алюминия, о чем свидетельствуют приведенные ниже значения:

| Свойство                | Металл |      |
|-------------------------|--------|------|
|                         | Mg     | Al   |
| Теплота плавления, Дж/г | 376    | 398  |
| Теплоемкость, Дж/г · К  | 1,04   | 1,09 |

В то же время, несмотря на почти одинаковые температуры плавления ( $660^{\circ}\text{C}$  для Al), для получения одинаковых объемов расплава магний требует в 1,5 раза больших затрат тепловой энергии.

6. Объемная усадка магния достаточно высока и составляет 3,9-4,4%, что соответственно влечет за собой установку достаточно массивных прибылей.

Механические свойства магния в литом состоянии невелики. Предел прочности его составляет 80-100 мПа, что, однако, значительно вы-

ше предела прочности литого алюминия (50-60 мПа); при этом относительное удлинение составляет 6-8%, в то время как для Al аналогичный показатель – в разы выше (40-50%). В связи с низкими механическими свойствами в качестве материала для фасонного литья чистый магний не используется.

8. Сплавы магния по сравнению со сплавами на других основах обладают более высокой удельной вибрационной прочностью (почти в 100 раз больше, чем у дюралюмина и в 20 раз большей, чем у легированной стали), что очень важно для авиации и транспорта.

Большую выгоду дает применение магниевых сплавов в деталях, работающих на изгиб. Удельная жесткость магниевых сплавов при изгибе и кручении превышает удельную жесткость большинства алюминиевых сплавов примерно на 20%, а сталей – на 50%.

9. Следует отметить исключительно высокую обрабатываемость резанием. Мощность, требуемая для снятия одинакового объема металла, при обработке алюминиевых сплавов в 1,5-2 раза выше, а при обработке стали – в 6-7 раз выше, чем для магния.

10. Магниевые сплавы в горячем состоянии хорошо куются, пресуются, прокатываются. Все это выдвинуло магниевые сплавы на одно из лидирующих мест среди современных конструкционных материалов, особенно для применения их в аэрокосмическом комплексе.

### **1.3. Легирующий комплекс и группы литейных магниевых сплавов**

В настоящее время общепризнано, что все многообразие факторов, оказывающих влияние на сопротивление металлических материалов пластической деформации и разрушению, сводится к 2 факторам:

1. Прочности межатомных связей.
2. Структурному состоянию материала.

Процесс разрушения металлов и сплавов происходит путем разры-

ва межатомных связей в кристалле. Роль структурного фактора сводится к тому, что он позволяет в определенных пределах изменять силу межатомных связей.

Для повышения величины межатомных связей в твердом растворе следует легировать металлы элементами, имеющими, по сравнению с основной сплава, более высокие температуры плавления и большую величину энергии связи.

Структурное состояние сплавов характеризуется степенью несовершенства кристаллической решетки, которое сводится к наличию примесных атомов, размером, формой и плотностью дисперсных выделений внутри зерен и по границам зерен, состоянием границ зерен, величиной зерна и т.п.

В соответствии с вышесказанным, легирующими элементами для создания магниевых сплавов являются элементы:

1. Образующие достаточно обширные области твердых растворов с магнием.
2. Имеющие переменную растворимость в зависимости от температуры, что позволяет изменять степень искажения кристаллической решетки твердого раствора, связанную с размещением атомов различных размеров, за счет режимов термической обработки.
3. Формирующие стабильные избыточные фазы в виде дисперсных частиц, выделяющихся в результате термической обработки.
4. Способствующие достижению мелкозернистого строения.

Только с одним элементом – кадмием – магний образует непрерывный ряд твердых растворов.

Применение кадмия в качестве легирующего элемента – ограничено, так как размеры атомов его мало отличаются от размеров атомов магния. Кроме того, атомы кадмия имеют меньшую, чем магний, энергию связи в собственной кристаллической решетке. Вследствие этого вклад

кадмия в упрочнение магниевых сплавов невелик.

Пять элементов – такие, как литий, скандий, алюминий, индий и таллий – имеют растворимость более 10 атомных процентов. Еще 18 элементов имеют растворимость более одного атомного процента. Среди последних следует отметить серебро, марганец и цинк.

Особое место занимают элементы 3-ей группы Периодической системы элементов с недостроенными d-оболочками – такие, как скандий, иттрий, цирконий, редкоземельные металлы и торий. Эти элементы образуют с магнием ряд промежуточных фаз сложного состава. К недостаткам этих элементов следует отнести их высокую стоимость.

С учетом экономических и эксплуатационных показателей литейные магниевые сплавы можно разделить на группы:

1. Сплавы общего назначения, для которых наряду со служебными свойствами большое значение имеет стоимость их. Поэтому в качестве легирующих для них применяют широко используемые и сравнительно недорогие алюминий и цинк.
2. Сплавы, для которых решающим фактором являются служебные свойства, а стоимость не является определяющим фактором. В свою очередь, эти сплавы специального назначения можно подразделить на высокопрочные и жаропрочные. В качестве легирующих элементов для них применяются такие дорогие металлы, как серебро, цирконий, редкоземельные и торий.

#### **1.4. Составы и свойства сплавов системы Mg - Al - Zn**

С учетом сохранения высокой удельной прочности алюминий является наиболее приемлемым легирующим элементом, особенно с учетом значительной и переменной его растворимости в твердом магнии.

Диаграмма состояния Mg - Al приведена на рис. 1.1.

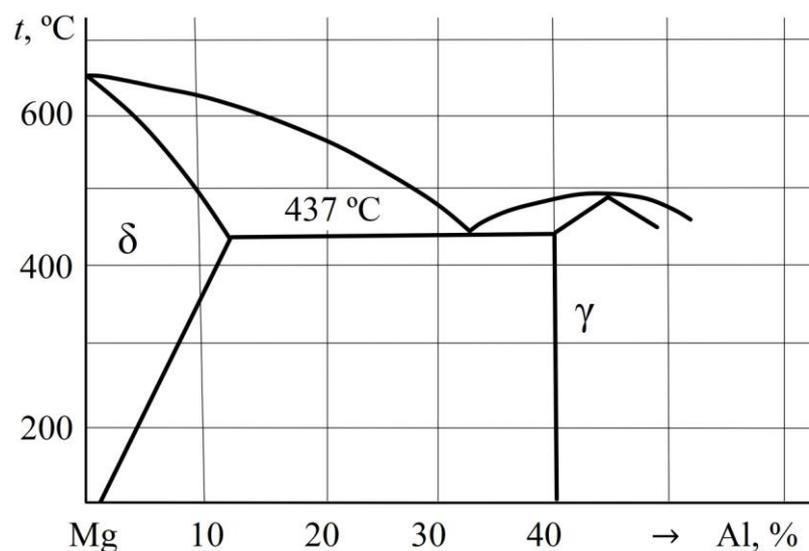


Рис. 1.1. Диаграмма состояния Mg - Al  
(содержание Al указано в % по массе)

Показанный на рис. 1.1 участок диаграммы состояния представляет собой систему эвтектического типа с температурой эвтектики 437 °С и содержанием алюминия 32,3%. Растворимость алюминия в твердом растворе уменьшается с 12,6% при температуре эвтектики до примерно 2% при 100° С.

Вследствие медленности протекания диффузионных процессов равновесие в сплавах Mg - Al при реальных скоростях охлаждения отливок недостижимо, и в твердом растворе в литом состоянии может содержаться до 6% алюминия. Поэтому и эффективное упрочнение за счет термической обработки будет наблюдаться для сплавов, содержащих более 6% Al.

В области, богатой алюминием (чуть более 40%), образуется  $\gamma$ -фаза. Расплывчатый максимум на температуре ликвидуса и широкая область гомогенности этой фазы допускали различную трактовку в отношении ее состава ( $Mg_3Al_2$ ,  $Mg_4Al_3$ ,  $Mg_{17}Al_{12}$ ). В последнее время предпочтение отдается соединению  $Mg_{17}Al_{12}$ .

Для того, чтобы магниевые сплавы могли конкурировать с алюминиевыми в части удельной прочности, они должны иметь механические

свойства:

- условный предел текучести более 90 МПа;
- временное сопротивление разрыву более 200 МПа;
- относительное удлинение более 5%.

Из двойных сплавов Mg - Al в литом состоянии этим условиям частично удовлетворяют сплавы в достаточно узкой области составов (7-8% Al). По мере снижения Al можно вводить цинк.

Наиболее приемлемый уровень свойств в литом состоянии ( $\sigma_{0,2} > 60$  МПа,  $\sigma_B > 200$  МПа,  $\delta > 9\%$ ) обеспечивают сплавы, содержащие примерно 4-5,5% алюминия и не более 2-3% цинка.

Структура литых сплавов состоит из  $\delta$  – твердого раствора с включениями по границам зерен  $\gamma$ -фазы ( $Mg_{17}Al_{12}$ ), количество которой увеличивается по мере увеличения содержания алюминия и цинка. При отношениях цинка к алюминию более одной трети может появиться тройная фаза:



Применение термической обработки позволяет существенно расширить область составов и повысить механические свойства.

Сплавы, имеющие в литом состоянии гетерогенное строение, после закалки приобретают более высокие значения предела прочности и относительного удлинения. Условный предел текучести возрастает в меньшей степени. Повышение относительного удлинения, достигаемое в результате закалки, создает предпосылки для расширения возможных составов сплавов, которые путем дальнейшего дисперсионного твердения могут обеспечить требуемый уровень свойств. Расширение области составов позволяет подойти к выбору сплавов с учетом технологических свойств.

В соответствии с ГОСТ 2856-79 «Сплавы магниевые литейные» марочный состав сплавов Мл 3, Мл 4, Мл 5, Мл 6 охватывает диапазон

концентраций по алюминию – (2,5-10,2%), по цинку – (0,2-3,5%), по марганцу – (0,15-0,5%); магний – остальное.

К числу примесей, которые присутствуют во всех литейных магниевых сплавах, относятся кремний, железо, никель, медь, цирконий, бериллий. Первые четыре отрицательно сказываются на коррозионной стойкости. В зависимости от их содержания сплавы Мл 4, Мл 5 и Мл 6 могут быть сплавами обычной чистоты с суммарным содержанием примесей, равным 0,5%, и сплавами повышенной чистоты Мл 4пч, Мл 5пч, Мл 6пч с содержанием примесей не более 0,13%. Марганец вводится в основном для повышения коррозионной стойкости. Возможно, что марганец образует с примесями, которые снижают коррозионную стойкость (особенно с железом) интерметаллиды, осаждающиеся при плавке и выдержке расплава на дно тигля. Кроме того, могут образовываться окислы марганца, которые уплотняют рыхлую пленку окиси магния.

Наиболее широкое применение находит сплав Мл 5, который на отдельно отлитых образцах имеет в состоянии Т4  $\sigma_{0,2} \geq 90$  мПа,  $\sigma_B \geq 235$  мПа,  $\delta \geq 5\%$ , а в состоянии Т6  $\sigma_{0,2} \geq 110$  мПа,  $\sigma_B \geq 235$  мПа,  $\delta \geq 2\%$ .

Детали из сплавов системы магний - алюминий - цинк могут работать при температурах не выше 150° С.

Сплавы Mg - Al - Zn имеют особенности, одни из которых свойственны всем магниевым сплавам (медленность протекания диффузионных процессов, окисляемость и способность к самовозгоранию при плавке и литье), другие (склонность к образованию грубозернистой структуры) характерны только для сплавов этой группы. Поэтому сплавы системы Mg - Al - Zn необходимо модифицировать.

Медленность протекания диффузионных процессов способствует дендритной ликвации и существенному, относительно равновесного состояния, снижению температуры солидуса. Это обстоятельство приходится учитывать при выборе режима нагрева до температуры закалки и

продолжительности выдержки при этой температуре. Необходимо, начиная с температуры 200-250° С, производить очень медленный (не более 30-40°/час) нагрев до температур закалки (415° С для сплава Мл 5). Время гомогенизации при температуре закалки составляет 8-16 часов и зависит от толщины отливки и вида литья (кокиль или песчаная форма). Чем выше скорость охлаждения отливки, тем больше разветвленность дендритов, тем меньше размеры избыточных фаз, выделяющихся в литой структуре в междендритных пространствах. Медленность протекания диффузионных процессов не требует высоких скоростей закалки. Охлаждение отливок производится на воздухе.

К существенным недостаткам сплавов Mg - Al - Zn следует отнести склонность их к развитию газоусадочной пористости, которая может проявляться в виде микрорыхлоты по границам зерен. Чем толще отливка, тем большая пористость развивается в ней, тем ниже механические свойства в стенке отливки.

### **1.5. Модифицирование сплавов Mg - Al - Zn**

Гексагональная плотноупакованная решетка магния предполагает образование крупнокристаллического строения. Это «наследственное» влияние проявляется и в Mg - Al - Zn сплавах. Мелкокристаллическое строение и повышение механических свойств можно получить с помощью модифицирования.

Большое разнообразие способов измельчения зерна магния и его сплавов можно разделить на 2 группы:

1. Физические.
2. Металлургические.

Физические методы связаны с динамическими воздействиями на расплав в процессе его кристаллизации. Это достигается введением звуковых и ультразвуковых колебаний или за счет использования маг-

нитных или электрических полей, приводящих к перемешиванию затвердевающего металла. Эти способы требуют специального оборудования, и их технологически легче осуществить при производстве слитков. Для фасонолитейного производства более приемлемыми являются металлургические методы, которые основаны на «затравочном» действии модифицирующих добавок, вводимых в расплав в процессе приготовления сплава. В соответствии с принципом структурного и размерного соответствия добавка действует тем эффективнее, чем ближе кристаллическое строение и параметр решетки ее к основному металлу.

Одинаковый с магнием тип решетки (ГПУ) и близкие параметры решеток имеют цирконий, иттрий и скандий (табл. 1.1).

**Таблица 1.1**

Параметры кристаллических решеток металлов, обладающих ГПУ строением

| № п/п | Металл   | Полиморфная модификация, температура, °С | Параметры, Å <sup>0</sup> |       | Отношение с/а |
|-------|----------|--|---------------------------|-------|---------------|
|       |          |  | а                         | с     |               |
| 1     | Магний   | нет                                      | 3,202                     | 5,199 | 1,62          |
| 2     | Цирконий | нет                                      | 3,23                      | 5,14  | 1,59          |
| 3     | Иттрий   | α (ГПУ) - до 1479                        | 3,650                     | 5,741 | 1,58          |
|       |          | β (ОЦК) - выше 1479                      | –                         | –     | –             |
| 4     | Скандий  | α (ГПУ) - до 1330                        | 3,309                     | 5,268 | 1,60          |
|       |          | β (ОЦК) - выше 1330                      | –                         | –     | –             |

Видно, что при одинаковом типе решеток наиболее близкими для магния параметрами обладает цирконий. Он и является прекрасным модификатором для сплавов, не содержащих в своем составе алюминий. В присутствии алюминия цирконий образует с ним тугоплавкие интерметаллиды, которые осаждаются на дно печи, а, попадая в металл, оказывают отрицательное влияние на его свойства.

Другими металлургическими методами измельчения зерна в спла-

вах системы Mg - Al - Zn являются:

1. Перегрев расплава до температуры порядка 875-925° С.
2. Обработка сплава хлором и его соединениями.
3. Обработка расплава углеродистыми веществами и некоторые другие.

Модифицирование перегревом – несложная операция, заключающаяся в том, что приготовленный расплав после его рафинирования нагревают до 875-925° С и выдерживают при этих температурах 15 или 10 минут соответственно. Затем сплав охлаждают до температуры литья и разливают. Механизм модифицирования сводится к тому, что с повышением температуры увеличивается растворимость железа (с 0,035% при температуре 700° С до 0,22% при 950° С). При охлаждении происходит выделение железа в виде различных алюминидов ( $FeAl$ ,  $Fe_2Al_5$ ,  $FeAl_3$ ), которые и оказывают модифицирующий эффект. Наибольшее влияние, по всей видимости, принадлежит  $FeAl_3$ , решетка которого изоморфна с решеткой магния. В пользу такого механизма говорит тот факт, что в сплавах без алюминия модифицирование железом не наблюдается. Данный метод имеет недостатки, которые исключают применение его в промышленной практике. Они сводятся к тому, что для перегрева затрачивается дополнительная энергия и время. Кроме того, происходит повышенный износ тиглей и ухудшение коррозионной стойкости сплавов. Замена перегрева на дополнительное введение в расплав железа в виде серого чугуна или хлорного железа не устраняет отрицательного влияния на коррозионную стойкость сплавов.

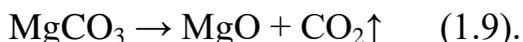
Обработка расплава хлором также является эффективным способом измельчения зерна в Mg - Al - Zn сплавах. На сплавы без алюминия хлорирование оказывает слабое действие. Механизм модифицирования не совсем ясен. Предполагают, что хлорирование обеспечивает более дисперсное распределение примесей, рафинирование от неметаллических включений и дегазацию расплава.

Недостатком этого способа является образование в расплаве мельчайших частиц хлористого магния, для удаления которых требуется введение точно рассчитанного количества загустителей, в качестве которых используют окись магния и фтористый кальций. Кроме того, ухудшается экологическая обстановка в цехе. По этим причинам способ не нашел применения.

Наиболее подходящим методом модифицирования является обработка расплава углеродсодержащими веществами. Большим достоинством этого метода является возможность получения мелкого зерна без перегрева металла выше температуры литья.

К числу углеродистых материалов относятся: магнезит, мрамор, мел, каменный уголь, кокс, графит, двуокись углерода, природный газ и другие. При флюсовой плавке магниевых сплавов наибольшее применение находит модифицирование магнезитом.

Магнезит в виде мелкой крошки в количестве 0,3-0,4% от массы шихты заворачивается в пакет из тонкой бумаги и с помощью колокольчика в 2-3 приема вводится в расплав, нагретый до температуры 720-740° С. Колокольчик опускают в расплав примерно до половины высоты тигля. При этом происходит разложение магнезита с образованием двуокиси углерода:



Поднимающиеся пузырьки двуокиси углерода взаимодействуют с магнием:



Освободившийся углерод взаимодействует с находящимся в сплаве алюминием:



Образовавшийся карбид алюминия имеет одинаковую с магнием гексагональную кристаллическую решетку с близкими параметрами и

оказывает модифицирующий эффект.

Обработку продолжают до прекращения выделения пузырьков, дают сплав отстояться в течение примерно 15 минут и производят разливку.

Недостаток этого способа заключается в том, что образуется большое количество окислов магния. При флюсовой плавке в процессе выстаивания они осаждаются на дно тигля.

При бесфлюсовой плавке модифицирование может осуществляться путем фильтрации расплава через раскаленный кокс или древесный уголь. Этот метод легко использовать при дуплекс-процессе во время раздачи металла из плавильной печи или введения в расплав примерно 0,2% активированного угля.

### 1.6. Высокопрочные сплавы системы Mg - Zn - Zr

Явление измельчения зерна магния под воздействием циркония, сопровождаемое существенным повышением прочностных и пластических свойств (рис. 1.2), было обнаружено в 1937 году и послужило основанием для разработки сплавов без алюминия.

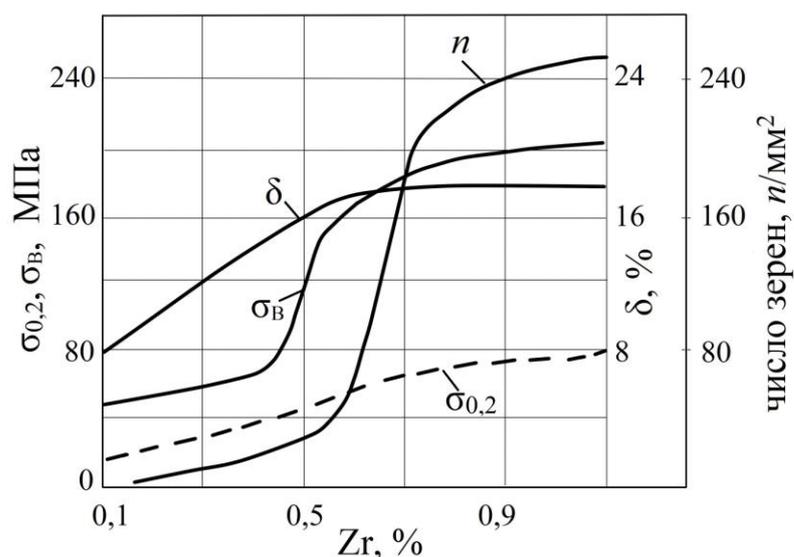


Рис. 1.2. Влияние циркония на число зерен ( $n/\text{мм}^2$ ), предел прочности ( $\sigma_B$ ), предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) и относительное удлинение ( $\delta$ ).

Видно, что наибольшее измельчение зерна происходит при содержаниях циркония более 0,5%. При этом наблюдается и наиболее сильное повышение условного предела прочности. Условный предел текучести интенсивно повышается до содержания циркония около 0,5-0,6%. Объяснение полученных результатов можно получить из рассмотрения диаграммы состояния сплавов магний - цирконий (рис. 1.3).

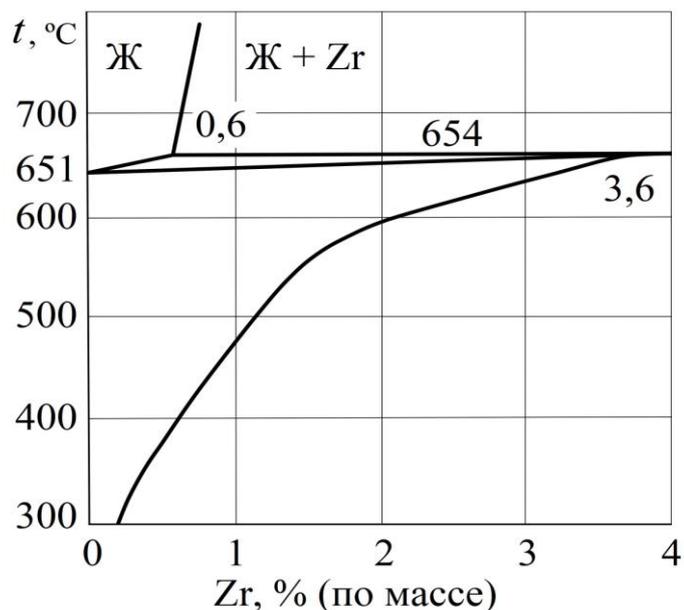


Рис. 1.3. Начальный участок диаграммы состояния сплавов Mg - Zr.

Со стороны магния при температуре 654° С имеется перитектическое превращение. Растворимость циркония в жидком магнии при этой температуре составляет 0,6%, а в твердом магнии 3,6%. Растворимость циркония в твердом магнии при понижении температуры резко уменьшается и при 300° С составляет около 0,3%. Следует обратить внимание на резкое повышение температуры ликвидуса при содержаниях циркония свыше 0,6%.

В сплавах, содержащих 0,6% и более циркония к моменту кристаллизации основного твердого раствора будут находиться кристаллы циркония, которые являются зародышами. Структура сплава измельчается. Заметное уменьшение размера зерен в сплавах наблюдается при

меньших содержаниях циркония. Уже после введения 0,2-0,3% Zr размер зерна уменьшается в 30-40 раз, а при введении 0,5-0,6% – в 80-100 раз.

Несмотря на то, что принятое по ГОСТу содержание циркония в сплавах укладывается в пределы от 0,4 до 1,1%, фактическое его содержание должно быть меньше. Для получения высоких механических свойств желательно иметь в сплаве не менее 0,6% циркония, а получить более 1,0% в реальных литейных цехах крайне затруднительно.

Модифицирующий эффект циркония сохраняется при введении в магний таких элементов, как цинк, кадмий, церий, кальций, торий, серебро, которые являются легирующими для некоторых сплавов и элементов, которые присутствуют как примеси – таких, как свинец, висмут, таллий, медь и бериллий. В то же время алюминий, кремний, марганец, никель, железо, сурьма и водород уменьшают модифицирующий эффект, так как образуют с цирконием не растворимые в магнии интерметаллидные соединения. В связи с этим сплавы с цирконием не легируют алюминием и марганцем.

Легирование сплавов магний - цирконий цинком способствует повышению прочностных характеристик. Условный предел текучести растет при увеличении цинка до 10%, а временное сопротивление разрыву – до 5,5-6% цинка. Относительное удлинение при этом снижается, но остается на достаточно высоком уровне (примерно 5-6%). Типичным представителем сплавов системы Mg - Zn - Zr является сплав Мл 12, содержащий 4,0-5,0% цинка и 0,6-1,1% циркония.

Основное преимущество этого сплава по сравнению со сплавом Мл 5 заключается в том, что он обеспечивает более высокие прочностные характеристики при достаточно высоком относительном удлинении в литом состоянии или после низкотемпературного отпуска (Т1).

В состоянии Т1 сплав должен обеспечивать  $\sigma_b \geq 226$  МПа,  $\sigma_{0,2} \geq 127$

мПа,  $\delta \geq 5\%$ . Он может длительно работать при температурах до  $200^\circ\text{C}$ , а кратковременно – до  $250^\circ\text{C}$ .

На базе 3-ей системы Mg - Zn - Zr могут быть получены сплавы с 8-9% цинка, которые после полной термической обработки обеспечивают получение временного сопротивления разрыву около 300-310 мПа, однако, удлинение при этом очень низкое – не более 1,5-2,5%.

Дополнительное легирование серебром позволяет сохранить прочностные характеристики на высоком уровне с одновременным повышением пластических свойств.

Серебро с магнием со стороны магния образует диаграмму состояния эвтектического типа с переменной в зависимости от температуры растворимостью серебра в магнии. При эвтектической температуре ( $471^\circ\text{C}$ ) растворимость составляет около 15,5% (по массе) и резко уменьшается при понижении температуры и составляет 8,0, 3,0 и  $< 1,0\%$  при  $400$ ,  $300$  и  $200^\circ\text{C}$  соответственно. Распад твердого раствора происходит с образованием интерметаллида  $\text{Mg}_3\text{Ag}$ , который, как и магний, имеет гексагональную решетку с параметрами  $a = 4,94 \text{ \AA}$ ,  $c = 7,82 \text{ \AA}$  и  $c/a = 1,58$ .

При небольших содержаниях серебра тройные сплавы Mg - Zr - Ag нечувствительны к термической обработке, и только присутствие цинка позволяет повысить прочностные свойства за счет закалки с последующим искусственным старением. Упрочнение происходит за счет выделения фазы  $\text{AgZn}$  в дисперсном виде. Сплав системы Mg - Zn - Zr - Ag - Cd входит в ГОСТ 2586 под маркой Мл 18.

Учитывая дефицитность серебра, был разработан сплав Мл 22, который еще не введен в ГОСТ и отличается от Мл 18 тем, что вместо серебра вводится более высокое содержание кадмия, который полностью входит в твердый раствор. Химический состав сплавов и их свойства приводятся в таблице 1.2.

**Таблица 1.2**

**Химический состав и механические свойства  
высокопрочных магниевых сплавов**

| Марка сплава | Химический состав, % |         |         |         | Механические свойства |                      |              |
|--------------|----------------------|---------|---------|---------|-----------------------|----------------------|--------------|
|              | Zn                   | Zr      | Ag      | Cd      | $\sigma_B$ , МПа      | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % |
| Мл 18        | 7-8                  | 0,7-1,1 | 1,0-1,6 | 0,4-1,0 | 330                   | 250                  | 5,0          |
| Мл 22        | 8-9                  | 0,7-0,8 | –       | ~3,0    | 310-340               | –                    | 5,0-8,0      |

По сравнению со сплавами Mg - Zn - Al сплавы системы Mg - Zn - Zr - (Me) обладают рядом преимуществ:

1. Более высокие значения пределов прочности и текучести.
2. Меньшая чувствительность к толщине стенки отливки, т. к. сплавы Mg - Zn - Zr проявляют меньшую склонность к развитию микрорыхлости. Поры располагаются в виде отдельных включений по границам зерен. В сплавах Mg - Al - Zn пористость имеет разветвленный характер и располагается в виде цепочки по границам зерен.
3. Более высокое отношение предела текучести к пределу прочности. У сплавов Mg - Zn - Al оно составляет (1/3 - 1/2,5), в то время как у сплавов Mg - Zn - Zr - (Me) оно примерно равно 2/3.

### **1.7. Жаропрочные литейные магниевые сплавы**

К жаропрочным сплавам на магниевой основе относят сплавы, способные длительно работать при температурах 250-350° С и коротко-временно – до 400° С, что примерно на 150-200° С превосходит рабочие температуры для сплавов Mg - Al - Zn и Mg - Zn - Zr.

В основу создания жаропрочных магниевых сплавов были положены следующие положения:

1. Создание сложнолегированного, устойчивого при повышенных температурах твердого раствора. Повышение термической устойчивости твердого раствора достигается за счет увеличения электронной кон-

центрации сплавов, следовательно, за счет легирования магния элементами с большей валентностью. При этом происходит увеличение силы межатомных связей.

2. Создание гетерофазной структуры с дисперсными частицами, выпадающими внутри твердого раствора в результате старения. Эти частицы играют роль препятствий, тормозящих движение и переползание дислокаций в условиях ползучести.
3. Повышение термической стабильности избыточных фаз, выделяющихся внутри зерна и по границам зерен. Торможению диффузионных процессов на границе раздела твердый раствор – упрочняющая фаза способствует уменьшение в составе фазы основы сплава – магния.

С учетом этих положений в качестве основных легирующих элементов выбраны редкоземельные металлы (РЗМ).

Согласно рекомендациям Международного союза по общей и прикладной химии термин «редкоземельные металлы» должен применяться для элементов от лантана до лютеция, занимающих номера в таблице Д. И. Менделеева от 57 до 71, а также для скандия (номер 21) и иттрия (номер 39). В соответствии со свойствами и присутствием в рудных месторождениях РЗМ делят на 2 подгруппы: цериевую и иттриевую. Цериевую подгруппу составляет легкие РЗМ первой половины ряда лантана: лантан, церий, празеодим, неодим, прометий, самарий и европий. Иттриевую группу составляют тяжелые элементы второй половины ряда лантана: гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций. К этой же группе относится и иттрий.

Несмотря на определение «редкоземельные», в сумме содержание их в земной коре составляет  $(1,6-1,7) \cdot 10^{-2}\%$  (по массе), что значительно превышает содержание таких широко применяемых металлов, как медь ( $1 \cdot 10^{-2}\%$ ), никель ( $8 \cdot 10^{-3}\%$ ), олово ( $4 \cdot 10^{-3}\%$ ), цинк ( $5 \cdot 10^{-3}\%$ ) и многих других. Наибольшие запасы находятся в Китае. В водах Тихого океана об-

наружены обширные залежи РЗМ, которые, по оценкам экспертов, содержат от 80 до 100 млрд. тонн, что значительно превышает содержание их в земной коре (порядка 100 млн. тонн).

Интересной особенностью является то, что содержание РЗМ, занимающих четные номера, в несколько раз превышает содержание элементов, занимающих нечетные номера. Содержание каждого элемента уменьшается по мере увеличения номера в периодической таблице.

Наиболее распространенными являются иттрий ( $28 \cdot 10^{-4}\%$ ), лантан ( $18 \cdot 10^{-4}\%$ ), церий ( $45 \cdot 10^{-4}\%$ ), неодим ( $25 \cdot 10^{-4}\%$ ).

Важной особенностью РЗМ является (за исключением европия и иттербия) относительное постоянство атомных размеров и валентностей и близкие физико-химические свойства.

Все диаграммы состояния магния с РЗМ характеризуются образованием сложных по составу интерметаллидных фаз, которые для ряда систем имеют одинаковый тип кристаллической решетки. Общие черты диаграмм состояния проявляются и в одинаковом характере невариантных превращений. Со стороны магния в большинстве систем имеет место эвтектическое превращение.

Параметры некоторых диаграмм состояния приведены в таблице 1.3. Из представленных значений видно, что по мере увеличения номера элемента-лантаноида в периодической системе увеличивается предельная растворимость его в магнии и его концентрация в эвтектике с одновременным снижением эвтектической температуры.

Во всех системах Mg с РЗМ температура эвтектики на  $100-150^\circ\text{C}$  превышает температуру эвтектик в системе Mg - Al и более чем на  $200^\circ\text{C}$  в системе Mg - Zn. Естественно, что разупрочнение в сплавах с РЗМ начинается при более высоких температурах. Переменная растворимость РЗМ в магнии в твердом состоянии создает предпосылки для упрочняющей термической обработки, состоящей из закалки и последующего

искусственного старения.

**Таблица 1.3**

Параметры диаграмм состояния магния с РЗМ

| Система | № в Период. таблице | $C_{II}$ , % | $C_O$ , %                 | $C_{Э}$ , % | $t_{Э}$ , °С | Вторая фаза в эвтектике          |
|---------|---------------------|--------------|---------------------------|-------------|--------------|----------------------------------|
| Mg - Y  | 39                  | 12,0         | 2,2 (200 <sup>0</sup> С)  | 26,6        | 565          | Mg <sub>24</sub> Y <sub>5</sub>  |
| Mg - La | 57                  | 16,5         | 0,01 (300 <sup>0</sup> С) | 16,5        | 612          | Mg <sub>17</sub> La <sub>2</sub> |
| Mg - Ce | 58                  | 20,5         | 0,04 (300 <sup>0</sup> С) | 20,5        | 590          | Mg <sub>12</sub> Ce              |
| Mg - Pr | 59                  | 21,0         | 0,01 (200 <sup>0</sup> С) | 21,0        | 575          | Mg <sub>12</sub> Pr              |
| Mg - Nd | 60                  | 33,0         | 0,08 (200 <sup>0</sup> С) | 33,0        | 552          | Mg <sub>41</sub> Nd <sub>5</sub> |
| Mg - Gd | 64                  | 28,0         | 3,8 (300 <sup>0</sup> С)  | 28,0        | 544          | Mg <sub>6</sub> Gd               |

Наиболее полно исследованы механические свойства магниевых сплавов, легированных РЗМ цериевой подгруппы. Выяснено, что до определенного содержания легирование магния лантаном, церием, празеодимом и неодимом способствует возрастанию предела прочности и условного предела текучести при одновременном снижении пластичности. При этом упрочняющее действие разных РЗМ сильно различается. Наиболее низкий уровень упрочнения достигается у сплавов, легированных лантаном. Затем в порядке возрастания прочностных свойств следуют сплавы с церием, празеодимом и неодимом. Возрастание уровня прочностных свойств наблюдается в соответствии с возрастанием порядкового номера РЗМ в таблице Д. И. Менделеева и увеличением предельной растворимости его в магнии при эвтектической температуре. Соответственно, наиболее широкое применение находит сплав Мл 10, содержащий: (2,2-2,8)% неодима, (0,1-0,7)% цинка и (0,4-1,0)% циркония.

Введение цинка оказывает положительное влияние, которое основано на дополнительном упрочнении твердого раствора и на участии в образовании основной упрочняющей фазы (Mg, Zn)<sub>12</sub>Nd, дисперсные частицы которой выпадают в процессе старения закаленного на твердый

раствор сплава. Кроме того, цинк стимулирует образование и выпадение в процессе нагрева под закалку фаз, содержащих цирконий, – например,  $Zn_3Zr$ . При этом увеличивается содержание нерастворенного циркония и уменьшается содержание его в твердом растворе.

**Таблица 1.4**

Содержание циркония в сплавах системы Mg - Nd - Zr  
после различных режимов термической обработки

| Система              | Содержание циркония в твердом растворе, % по массе |      | Содержание циркония в фазах (нерастворенного), % по массе |      |      |
|----------------------|--|------|---|------|------|
|                      | Литое состояние                                    | T6   | Литое состояние   | T4   | T6   |
| Mg - Nd - Zr         | 0,61   | 0,52 | 0,04  | 0,1  | 0,11 |
| Mg - Nd - 0,3Zn - Zr | 0,61   | 0,38 | 0,1   | 0,20 | 0,23 |

В состав цирконидов входят также примеси Cu, Ni, Si, Fe, Al, содержащиеся в сплаве. Значительное увеличение содержания цирконидов в результате термической обработки сплавов, легированных цинком, объясняется, прежде всего, понижением растворимости водорода в твердом растворе и образовании гидридов циркония.

Сплавы типа Мл 10 не склонны к естественному старению. При искусственном старении распад твердого раствора происходит без заметной предварительной стадии, на которой могли бы образоваться зоны Гинье-Престона.

Сплав Мл 10 предназначен для изготовления высоконагруженных отливок, работающих при температурах 250-300° С.

Дальнейшее повышение механических свойств магниевых сплавов при повышенных температурах достигается за счет дополнительного легирования индием или иттрием. Введение (0,2-0,8)% индия (сплав Мл 9) или (1,4-2,2)% иттрия (сплав Мл 19) способствует уменьшению скорости

распада твердого раствора и замедлению коагуляции продуктов распада. Кроме того, иттрий способствует дальнейшему измельчению зерен в литом состоянии сплавов, содержащих цирконий. О степени влияния состава сплавов на свойства при повышенных температурах можно судить по данным таблицы 1.5.

**Таблица 1.5**

Свойства магниевых сплавов при нормальных и повышенных температурах

| Сплав, состояние                         | 20° С            |              | 250° С           |                      |              |
|--|------------------|--------------|------------------|----------------------|--------------|
|  | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % |
| Мл 5 (Т4)                                | 284,2            | 12,0         | 118,0            | 39,0                 | 15,0         |
| Мл 10 (Т6)                               | 265,0            | 6,0          | 186,0            | 122,5                | 18,6         |
| Мл 9 (Т6)                                | 245,0            | 6,0          | 186,0            | –                    | 23,0         |
| Мл 19 после 500 час. выдержки при 250° С | 274,4            | 8,0          | 250,0            | 156,8                | 10,0         |

Данные этой таблицы наглядно свидетельствуют о больших возможностях работы при повышенных температурах сплавов Mg - Zn - Zr - РЗМ по сравнению со сплавами Mg - Al - Zn.

Сплав Мл 19 является самым жаропрочным литейным магниевым сплавом. По сопротивлению ползучести он в 1,5-2,5 раза превосходит другие жаропрочные магниевые сплавы. Например, по пределу длительной прочности за 100 час. сплав Мл 19 превосходит сплав Мл 10 при 250° С в 1,5 раза, а при 300° С – в 2,5 раза, а сплав Мл 9 при 300° С – в 2 раза. Сплав Мл 19 целесообразно применять при температурах (250-300)° С.

Жаропрочные литейные магниевые сплавы обладают хорошим технологическими свойствами и повышенной герметичностью по сравнению со сплавами Mg - Al - Zn. Все они удовлетворительно свариваются аргоно-дуговой сваркой. Прочность сварного шва составляет не менее 85% от прочности основного металла.

## 1.8. Технологические свойства литейных магниевых сплавов

Технологические свойства сплавов играют важную роль в получении качественной отливки. Наиболее важными для литейщика являются:

1. Жидкотекучесть, характеризующая способность сплава заполнять форму. Непосредственно с ней связана возможность четкого воспроизводства полости формы. Для легких сплавов в литературе приводятся значения жидкотекучести, выраженные длиной прутка диаметром 5 мм, заливаемого в горизонтальную песчано-глинистую форму металлом, нагретым до 700° С.
2. Объемная усадка и распределение ее в отливке в виде усадочной раковины или усадочной пористости. Непосредственно с этим связана герметичность отливок.
3. Линейная усадка, которая, наряду с механическими свойствами металла, определяет склонность его к образованию горячих или холодных трещин. Кроме того, близкие для разных сплавов величины линейной усадки позволяют использовать одну и ту же модельную оснастку.
4. Склонность сплавов к образованию горячих трещин. Горячеломкость магниевых сплавов определялась по кольцевой пробе С. И. Спекторовой и Т. В. Лебедевой. Сущность методики заключается в том, что в песчаной форме заливаются 2 кольца толщиной 5 мм и внешним диаметром 108 мм. Внутренний диаметр заливаемого кольца оформляется стальными стержнями, размеры которых можно менять таким образом, что ширина кольца меняется от 5 до 42,5 мм через каждые 2,5 мм. Локализация горячей трещины вблизи питателя достигается за счет установки холодильников, представляющих собой половину круга диаметром 108 мм, в противоположных от питателя направлениях. За показатель горячеломкости принимается максимальная ширина кольца, на которой наблюдается трещина.

5. Склонность сплавов к понижению механических свойств с увеличением толщины стенки отливки.

Все эти свойства в той или иной мере связаны с характером затвердевания сплавов, который определяется температурным интервалом затвердевания и скоростью охлаждения.

Технологические свойства различных групп магниевых сплавов приведены в таблице 1.6.

**Таблица 1.6**

Технологические свойства магниевых сплавов различных систем

| № п/п | Марка сплава, система              | Температурный интервал затвердевания, °С | Жидкотекучесть, мм | Линейная усадка, % | Склонность к микрорыхлоте | Герметичность | Горячеломкость, мм |
|-------|------------------------------------|--|--------------------|--------------------|---------------------------|---------------|--------------------|
| 1     | Мл 5<br>Mg - Al - Zn               | 160-170                                  | 290-300            | 1,0-1,2            | средняя                   | средняя       | 30,0               |
| 2     | Мл 8<br>Mg - Zn - Zr               | —  | 335                | 1,1-1,3            | малая                     | —             | 25,0-30,0          |
| 3     | Мл 18<br>Mg - Zn - Zr - Ag<br>- Cd | 80-90                                    | 315                | 1,2-1,4            | средняя                   | повышенная    | 27,5-30,0          |
| 4     | Мл 10<br>Mg - Zn - Zr - Nd         | 80-90                                    | 250                | 1,2-1,5            | малая                     | повышенная    | 15-20              |

Магниевые сплавы, кристаллизуясь в широком температурном интервале, склонны к объемному характеру затвердевания. В связи с этим в отливках развиваются дефекты усадочного или ликвационного происхождения: слоистые, концентрированные, хлопьевидные и частично залеченные эвтектикой микрорыхлоты, а также «залеченные» трещины и даже зональная ликвация. Слоистые и концентрированные микрорыхлоты характерны для сплавов систем Mg - Al - Zn и Mg - Zn - Zr. В отливках из сплавов системы Mg - Zn - Zr - Nd встречаются микрорыхлоты всех 4 видов.

Слоистая пористость характеризуется чередованием тонких слоев сплава пониженной плотности, перемежающихся слоями нормальной плотности, располагающимися параллельно продвигающемуся фронту затвердевания. Причиной такого вида пористости является малая прочность сплава в твердо-жидком состоянии. Поэтому возможен отрыв отдельных затвердевающих слоев друг от друга. Возникшая трещина может заполняться эвтектикой. Тогда возникает дефект, определяемый как «залеченная» трещина, в зоне которой наблюдается более высокое содержание легирующих элементов. Концентрированные микрорыхлоты имеют сравнительно небольшие размеры (не более булавочной головки) и располагаются практически равномерно в теле отливки.

Хлопьевидные микрорыхлоты являются разновидностью концентрированных микрорыхлот. Размер хлопьев колеблется от 1 до 5 мм. Хлопья разделены между собой областями сплава нормальной плотности. Если во время кристаллизации в зону формирования усадочной микрорыхлоты фильтруется расплав эвтектического состава, находящийся в междендритных пространствах, возникает дефект, определяемый как «микрорыхлоты с эвтектикой».

Наиболее сильное влияние микрорыхлоты оказывают на относительное удлинение сплава, в меньшей степени – на прочностные характеристики. Из 4 типов микрорыхлот наиболее сильное влияние на снижение механических свойств оказывают концентрированные и микрорыхлоты с эвтектикой. Если микрорыхлоты соединяются с атмосферой, то они обнаруживаются на изломах в виде темных и желтых пятен или червоточин.

В отливках из сплавов Mg - Al - Zn иногда наблюдается обратная ликвация, которая образуется в местах расположения холодильников и проявляется на поверхности оксидированной отливки в виде серых или черных пятен. Повышение содержания алюминия в сплаве и температу-

ры заливки усиливают этот вид ликвации. Толщина наружного серого слоя, обогащенного алюминием, составляет от нескольких микрон до 1 мм. На механических свойствах этот дефект не сказывается и браковочным признаком не является.

## **ГЛАВА II. ПЛАВКА МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Высокая реакционная способность магния определяет такие элементы технологии плавки, как:

- плавку под флюсом (флюсовая плавка) или в защитной газовой среде (бесфлюсовая плавка);
- рафинирование (промывка расплава солями) для удаления неметаллических включений.

### **2.1. Печи для плавки магниевых сплавов и плавильный инструмент**

Для плавки магниевых сплавов могут применяться 2 типа печей: отражательные с газовым обогревом и тигельные с электрическим или газовым обогревом. Особенностью отражательной печи является то, что подина ее, во избежание взаимодействия с расплавом, набивается магнетитовым порошком, а затем выкладывается магнетитовым кирпичом. Боковые стенки магнетитовой ванны также выкладывают магнетитовым кирпичом, а свод печи – шамотным кирпичом.

Единственное преимущество отражательной печи заключается в возможности получения больших объемов расплава, поэтому применение их целесообразно в цехах заготовительного литья. В сравнении с тигельными печами отражательные имеют ряд недостатков, связанных с большой поверхностью расплава. Прежде всего, это большой угар металла, составляющий от 6% для сплавов Mg - Al - Zn и доходящий до 12% для сплавов Mg - Zn - Zr - РЗМ. Наряду с этим возможно насыще-

ние расплава водородом и необходим повышенный расход флюсов. В фасонолитейном производстве наибольшее распространение получили тигельные печи, работающие на газе, а чаще – с электрическим обогревом.

В зависимости от объемов производства и номенклатуры литья плавка может производиться в выемных или стационарных тиглях, а также применяться комбинированная плавка, при которой расплавление ведется в индукционных печах, затем металл переливается в тигли. Переливка с помощью центробежного насоса или сифона позволяет избежать сильного окисления сплава.

Особенность плавки в выемном тигле состоит в том, что он одновременно служит как емкость для приготовления металла и как разливочный ковш. Такой способ плавки целесообразно применять в цехах или участках, специализирующихся на производстве крупных отливок.

На рис. 2.1 показан общий вид электропечи сопротивления для плавки магниевых сплавов в выемных тиглях.

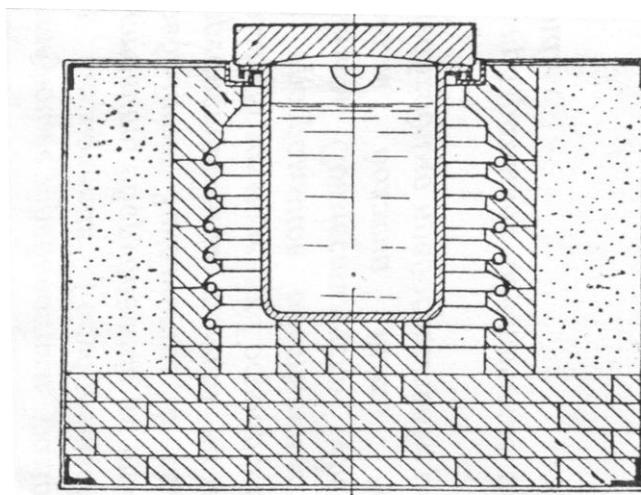


Рис. 2.1. Общий вид тигельной электропечи сопротивления.

Печь состоит из железного сварного кожуха, внутри которого выложена шамотная футеровка. Внутри печного пространства вставляется сварной стальной тигель с перегородкой. Печь углубляется в землю с таким расчетом, чтобы выступала над уровнем пола на высоту не более

300-500 мм, что создает возможность следить за ходом плавки и обеспечивает удобство выема тигля перед разливкой. Внизу печи устраивается специальный сток, по которому, в случае утечки, металл стекает в приямок.

Толщина стенки тиглей зависит от емкости печи и составляет от 8 до 15 мм. Сталь не должна иметь в своем составе никеля и меди, т. к. эти элементы крайне отрицательно сказываются на коррозионной стойкости магниевых сплавов. Необходим тщательный контроль тиглей перед каждой плавкой. При наличии трещин, вмятин или уменьшения толщины стенки более чем наполовину эксплуатация тигля прекращается. Проверку пригодности тигля иногда проводят путем наливания в него воды. При наличии течи эксплуатация тигля запрещается.

Электропечи этих конструкций применяются для тиглей вместимостью 50-100, а иногда и 250-350 кг. Производительность таких печей составляет 50-60 кг/час.

Основной недостаток печей электросопротивления заключается в медленном подъеме температуры, так как перепад температур между нагревателем (1000-1100° С) и расплавом (750-760° С) невелик. Этого недостатка лишены печи с газовым обогревом, в которых подъем температуры происходит гораздо быстрее и длительность плавки сокращается.

При небольших объемах производства и сравнительно небольших по массе отливках применяется плавка в стационарных тиглях. Особенность этого процесса состоит в том, что после приготовления металла разливка производится путем вычерпывания его из тигля небольшими ручными ковшами. На рис. 2.2 показан общий вид печи со стационарным тиглем.

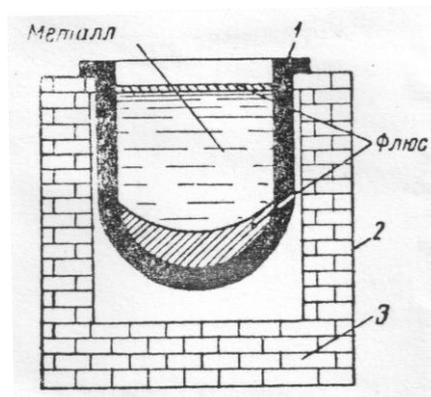


Рис. 2.2. Плавильная печь со стационарным тиглем:  
1 – стационарный тигель; 2 – кожух; 3 – кладка.

Печи со стационарным тиглем имеют обычно газовый или мазутный обогрев. Форсунки в печи располагаются под углом во избежание попадания факела горения на стенки или дно тигля. Печи со стационарным тиглем также рекомендуется заглублять. Тигли в этих печах изготавливаются литыми из малоуглеродистой стали или из чугуна. Размеры их зависят от емкости. Например, для емкости 180-200 кг тигли имеют следующие размеры: толщина дна – 90 мм, толщина стенок в верхней части – (25-30) мм, диаметр верхней части – (625-650) мм, внутренняя полезная высота – 600 мм. Производительность печей со стационарным тиглем емкостью 250 кг составляет 60 кг/час.

Один из вариантов стального литого стационарного тигля приведен на рис. 2.3.

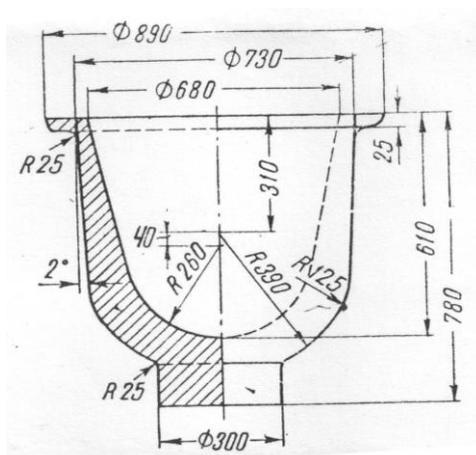


Рис. 2.3. Стационарный стальной литой тигель.

Особенностью литых тиглей является шаровидное дно и наклонные стенки, что существенно облегчает чистку тиглей.

На рис. 2.4 приведены конструкции сварных выемных тиглей.

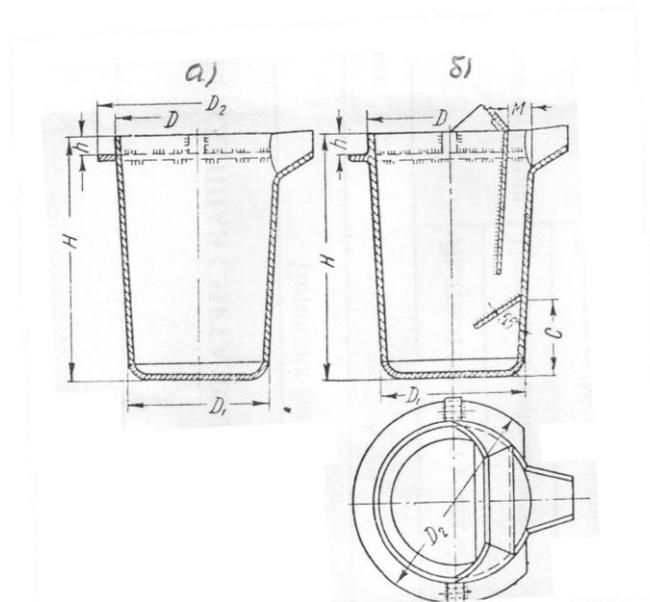


Рис. 2.4. Конструкции стальных сварных выемных тиглей без перегородки (а) и с перегородкой (б):

1 – корпус тигля; 2 – перегородка; 3 – косынка; 4 – козырек.

Наличие перегородки, косынки и козырька исключает попадание флюса в отливку во время разливки сплава.

При необходимости получения большого количества металла применяются индукционные тигельные печи, которые позволяют осуществлять дуплекс-процесс, при котором металл, выплавленный в индукционной печи, заливается в стационарные или выемные тигли.

Для плавки магниевых сплавов применяются печи промышленной частоты, которые обеспечивают более высокую мощность и КПД по сравнению с высокочастотными.

Индукционная тигельная печь для плавки магниевых сплавов состоит из стального тигля с крышкой, теплоизоляции, индуктора и магнитопровода. Особенностью печей является то, что применяется желез-

ный тигель, который является не только емкостью для расплава, но и служит источником нагрева для металла. Потребляемая энергия распределяется между тиглем и шихтой в соотношениях, зависящих от толщины тигля и температуры расплава. Например, при температурах ниже  $768^{\circ}\text{C}$  (точка Кюри) и толщине стенок тигля 20 мм вся потребляемая энергия затрачивается на нагрев стенок тигля. При температурах около  $800^{\circ}\text{C}$  (выше точки Кюри) даже при толщине стенки тигля 35 мм на нагрев его расходуется только лишь половина энергии. Вторая половина затрачивается на нагрев шихты. Связано это в первую очередь с неравномерностью распределения переменного электрического тока по сечению проводника. Называется это явление поверхностным эффектом или скин-эффектом.

Неравномерность распределения проявляется тем в большей степени, чем выше частота тока ( $\tau$ ), магнитная проницаемость ( $\mu$ ) и удельная электропроводность ( $\Delta = 1/\rho$ ), а также поперечное сечение проводника ( $s$ ).

Поверхностный эффект вызывается тем, что переменный ток создает переменное магнитное поле как внутри проводника, так и снаружи вокруг проводника.

Силовые линии этого переменного магнитного поля, пересекая тело проводника, индуцируют в нем э. д. с. (по закону индукции), различные для каждой точки проводника. Эти обратные э. д. с. имеют наибольшую величину в средней части проводника и наименьшую – на периферии. Неравномерность обратных э. д. с. вызывает неравномерное распределение плотности тока по сечению проводника. Наибольшая плотность тока создается на периферии и наименьшая – в средних зонах сечения.

При большом сечении проводника или при большой частоте тока уменьшение плотности тока по мере удаления от поверхности к центру проводника происходит по экспоненциальному закону, который выража-

ется зависимостью:

$$i_x = i_0 \cdot e^{-x/\delta} \quad (2.1),$$

где  $i_0$  – среднеквадратное значение плотности тока на поверхности проводника;

$i_x$  – среднеквадратное значение плотности тока на расстоянии  $x$  от поверхности проводника;

$e$  – основание натурального логарифма – 2,71;

$\delta$  – расстояние от поверхности проводника по направлению к центру, на котором плотность убывает в  $e = 2,71$  раз по сравнению с плотностью тока на поверхности. Это расстояние условно называют глубиной проникновения тока.

Глубина проникновения тока определяется следующей зависимостью:

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{m \cdot \tau}} \quad (2.2),$$

где  $\delta$  – глубина проникновения;

$\rho$  – удельное сопротивление проводника;

$m$  – магнитная проницаемость, определяемая лишь для магнитных тел; у диа- и парамагнетиков, а также для ферромагнетиков, находящихся при температуре выше точки Кюри, величина магнитной проницаемости снижается до единицы. В этом случае глубина проникновения тока увеличивается и может превысить толщину тигля.

Если увеличить толщину тигля, например, до 70 мм, то вся энергия будет расходоваться на нагрев толстостенного тигля. В этом случае на расплав не будут действовать электромагнитные силы и не будет перемешивания расплава. Это обстоятельство может играть положительную роль при плавке сплавов в защитных газовых средах. В то же время толстостенный тигель получается слишком тяжелым при использовании выемных тиглей и небольших масс расплава. К тому же, использование

толстостенных выемных тиглей приведет к большим потерям энергии. В связи с этим применение толстостенного тигля можно считать целесообразным для печей большой вместимости, работающих в качестве миксера. Такие условия могут быть реализованы в заготовительном литье. Для фасонолитейного производства более уместно использование тонкостенных тиглей.

Перемешивание металла под влиянием электромагнитных сил при флюсовой плавке оказывает положительное влияние, так как ускоряет процесс его рафинирования.

На рис. 2.5 приведена схема индукционной печи с толстостенным, а на рис. 2.6 – с тонкостенным тиглем.

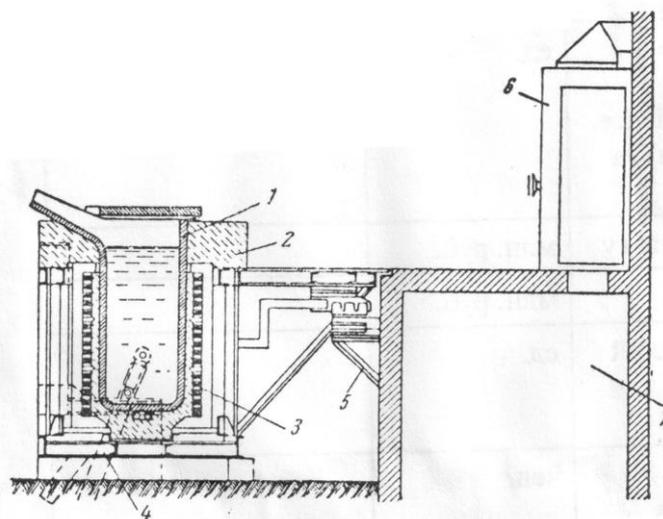


Рис. 2.5. Схема индукционной печи с толстостенным тиглем:  
1 – толстостенный железный тигель; 2 – тепловая изоляция;  
3 – индуктор; 4 – гидравлический подъемник; 5 – присоединение печи;  
6 – щит управления; 7 – помещение для конденсаторов.

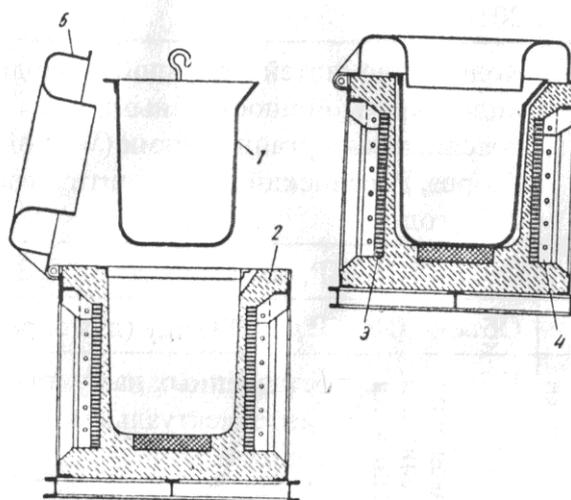


Рис. 2.6. Схема индукционной печи с тонкостенным тиглем:  
 1 – тонкостенный стальной тигель; 2 – теплоизоляция;  
 3 – индуктор; 4 – магнитопровод; 5 – крышка.

Для плавки магниевых сплавов применяются 2 типа индукционных тигельных печей – ИПМ и ИМТ. Некоторые характеристики этих печей приведены в таблице 2.1.

**Таблица 2.1**

Технические характеристики индукционных печей  
 для плавки магниевых сплавов

| № п/п | Показатель                                    | Тип печи |       |         |         |
|-------|---|----------|-------|---------|---------|
|       |   | ИМТ-1,6  | ИМТ-4 | ИПМ-300 | ИПМ-500 |
| 1     | Емкость печи, кг                              | 1600     | 4000  | 300     | 500     |
| 2     | Потребляемая мощность, кВт                    | 562      | 1000  | 100     | 120     |
| 3     | Число фаз                                     | 1        | 1     | 2       | 2       |
| 4     | Частота, Гц                                   | 50       | 50    | 50      | 50      |
| 5     | Напряжение на индукторе, В                    | 160      | –     | 380/220 | 380/220 |
| 6     | Производительность, кг/час                    | 1000     | 2000  | 360     | 400     |
| 7     | Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/1000 кг | 577      | 500   | 380     | –       |

Наряду со специальными конструкциями тиглей для плавки магниевых сплавов применяется специальный инструмент, предназначенный для модифицирования, снятия и нанесения флюсов, ковши для разливки сплавов (рис. 2.7, 2.8, 2.9, 2.10).

На рис. 2.7 показан колокольчик, предназначенный для введения в

расплав модифицирующих или легирующих добавок.

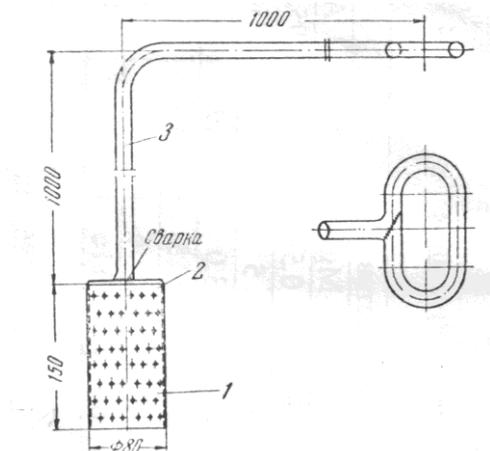


Рис. 2.7. Колокольчик для введения различных добавок:  
1 – цилиндр колокольчика; 2 – дно колокольчика; 3 – рукоятка.

На рис. 2.8 показан совок для нанесения флюса на расплав.

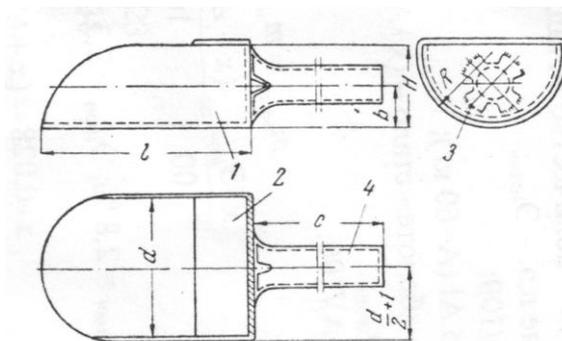


Рис. 2.8. Совок для нанесения флюса на расплав:  
1 – корпус; 2 – крышка; 3 – дно совка; 4 – рукоятка.

Ложка-шумовка, предназначенная для снятия флюса, показана на рис. 2.9.

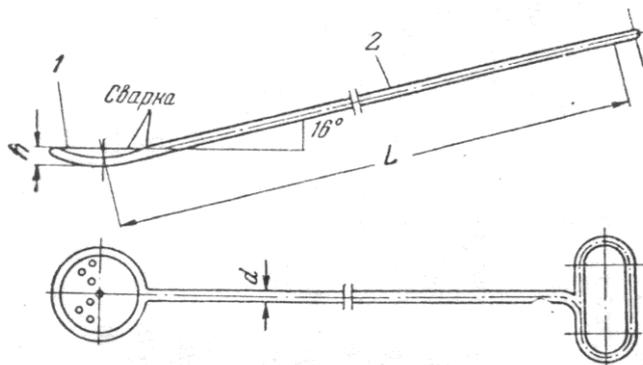


Рис. 2.9. Ложка-шумовка (шлакоочиститель):  
1 – ложка с отверстиями; 2 – рукоятка.

Разливка металла из стационарного тигля производится ручными ковшами вместимостью до 20 кг (рис. 2.10). Конструкция их должна исключить попадание флюса в отливку.

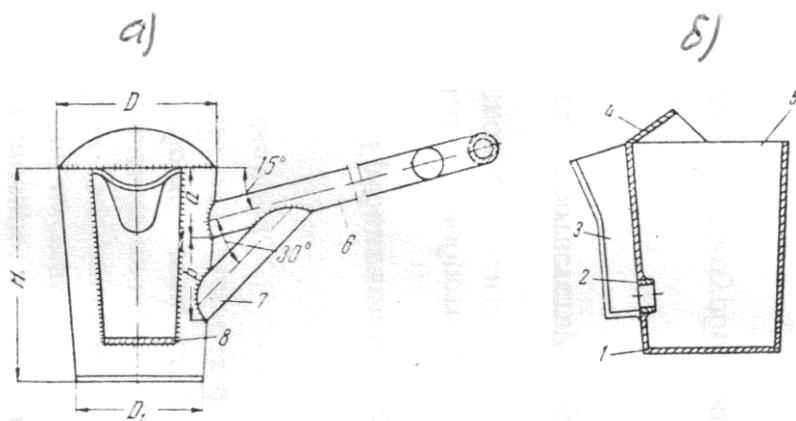


Рис. 2.10. Разливочный ковш для магниевых сплавов (а), разрез ковша (б): 1 – дно ковша; 2 – трубка ковша; 3 – желоб ковша; 4 – козырек ковша; 5 – корпус ковша; 6 – ручка; 7 – распорка; 8 – дно желоба ковша.

## 2.2. Шихтовые материалы

В состав шихты для изготовления магниевых сплавов могут входить первичные (технически чистые) металлы, первичные сплавы, возврат собственного производства и различные лигатуры.

Металлические шихтовые материалы, применяемые для плавки магниевых сплавов, приведены в таблице 2.2.

Для наиболее применяемых магниевых сплавов выпускаются готовые лигатуры Mg - Zr, Mg - Nd, Mg - Y, применение которых упрощает технологию приготовления расплава.

Мелкие отходы собственного производства (стружка, сливы из ковшей и др.) переплавляются на предварительный сплав. Технология плавки их практически не отличается от технологии выплавки рабочего сплава, за исключением того, что предварительные сплавы не модифи-

цируются. Предварительные сплавы используются в шихту после получения результатов химического анализа. Общее количество отходов в шихте, включающей предварительные сплавы, может достигать до 70-80%.

**Таблица 2.2**

**Шихтовые материалы для плавки магниевых сплавов**

| № п/п | Марка материала   | ГОСТ или ТУ      | Примечание  |
|-------|---|------------------|---|
| 1     | Магний первичный в чушках Мг 90, Мг 95  | ГОСТ 804-93      | Масса чушки (8 ± 1) кг  |
| 2     | Алюминий первичный в чушках А 7, А 8, А 8,5                                       | ГОСТ 11069-2001  | Масса чушки около 15 кг   |
| 3     | Цинк первичный в чушках Ц В, Ц О, Ц 1   | ГОСТ 3640-94     | Масса чушки 19-25 кг  |
| 4     | Сплавы магниевые в чушках: МА 8 Ц, МА 8 Цч, МА 8 Бч, МА 8 ЦБч, МА 10 Ц1, МЦр 1 НЗ | ГОСТ 2581-78     | Масса чушки (8 ± 1) кг. Предназначены для сплавов Мл 5, Мл 5пч, Мл 5 он, Мл 6 и Мл 10 |
| 5     | Лигатура алюминий - марганец с 10-12% Мп  | —                | Подшихтовка марганца в сплавы магний - алюминий - цинк                                |
| 6     | Сплав магний - неодим МН (30-35% неодима)   | ТУ 48-4-271-3    | Чушки массой около 5 кг   |
| 7     | Лигатура магний - цирконий Л2 со средним содержанием циркония 17-25%              | ТУ 48-10-33-75   | Чушки массой 7-8 кг   |
| 8     | Лигатура магний - иттрий МгИт, содержит 20-40% иттрия                             | ТУ 48-0504-13-76 | Чушки массой около 5 кг   |
| 9     | Отходы собственного производства  | —                | —   |

*Примечание:* сплав МА 8 Бч содержит 0,001-0,002% бериллия.

**2.3. Флюсы для плавки магниевых сплавов**

Флюсы должны обеспечить надежную защиту магниевых сплавов от взаимодействия с атмосферой печи и от загорания металла, а также произвести эффективное рафинирование расплава от неметаллических включений. Чтобы выполнить эти задачи, флюсы должны отвечать следующим требованиям:

1. Температура плавления флюса должна быть ниже температуры солидуса сплавов.

2. Плотность флюса при температуре разливки должна быть немного выше плотности расплава сплава.

3. Флюсы должны иметь определенную вязкость и поверхностное натяжение – в зависимости от способа плавки и состава сплава.

4. Не взаимодействовать с основой сплава и легирующими элементами.

Комплекс многих и нередко противоречивых требований в наибольшей степени могут обеспечить многокомпонентные смеси хлористых или фтористых солей. Свойства некоторых из них приведены в таблице 2.3. Здесь же для сравнения указаны свойства чистого магния и сплава Мл 5.

**Таблица 2.3**

Температуры плавления ( $t_{пл}$ ), плотность ( $\gamma$ ),  
динамическая вязкость ( $\mu$ ) и поверхностное натяжение ( $\sigma$ )  
некоторых хлоридов, фторидов, магния и сплава Мл 5

| Соль, металл      | $t_{пл}, ^\circ\text{C}$ | $\gamma, \text{кг/м}^3$ (при температуре, $^\circ\text{C}$ ) | $\mu, \text{Па}\cdot\text{с}$ (при температуре, $^\circ\text{C}$ ) $\times 10^3$ | $\sigma, \text{н/м}$ (при температуре, $^\circ\text{C}$ ) $\times 10^7$ |
|-------------------|--------------------------|--|--|---|
| MgCl <sub>2</sub> | 718                      | 1686 (722)   | 4,69 (751)<br>3,69 (852)   | 135,8 (733)<br>127,8 (796)  |
| NaCl              | 815                      | –  | 1,49 (816)<br>1,20 (850)   | 114,7 (800)<br>110,8 (850)  |
| KCl               | 768                      | 1515 (772)   | 1,42 (790)<br>1,06 (856)   | 97,7 (756)<br>93,3 (841)  |
| CaCl <sub>2</sub> | 774                      | 2060 (780)   | –  | –   |
| BaCl <sub>2</sub> | 960                      | 3057 (964)   | –  | –   |
| CaF <sub>2</sub>  | 1378                     | 2528 (1380)  | –  | –   |
| Mг 95             | 650                      | 1534 (700)   | 1,2 (655)  | 563 (681)   |
| Мл 5              | 490-600                  | 1614 (700)   | –  | –   |

Разнообразие марок сплавов, разных устройств и способов ведения плавки вызывают необходимость применения различных составов флюсов.

Из таблицы 2.3 видно, что все представленные в ней соли имеют

температуры плавления гораздо выше температуры плавления магниевых сплавов. В связи с этим основу флюсов должны составлять эвтектические смеси солей с низкими температурами эвтектик. В системе  $MgCl_2 - NaCl$  температуры могут меняться от  $450^\circ C$  до  $560^\circ C$ ; в системе  $MgCl_2 - KCl$  – от  $440^\circ C$  до  $610^\circ C$ . В связи с этим многие флюсы образованы на основе природного минерала карналлита, который представляет собой двойную соль хлоридов магния и калия ( $MgCl_2 \cdot KCl$ ). Для получения флюса с требуемыми значениями плотности, вязкости, поверхностного натяжения и смачиваемости неметаллических включений в карналлит вводят различные добавки.

Из приведенных в таблице 2.3 значений следует, что в качестве утяжелителей целесообразно использовать хлориды кальция, бария, фторид кальция. Важную роль для флюсов играет вязкость. При плавке в стационарных тиглях флюс должен быть жидкоподвижным для того, чтобы он мог очень быстро закрывать нарушенный при заборе металла покров. В то же время, при плавке в выемных тиглях вязкость должна быть большей, чтобы на поверхности расплава могла образоваться корка флюса, которая предохраняет металл во время разливки. В этом случае в состав флюса вводят загустители, в качестве которых могут применяться как нерастворимые (например,  $MgO$ ), так и растворимые (например,  $CaF_2$ ) во флюсе добавки.

Флюс должен хорошо смачивать неметаллические включения, чтобы обеспечить эффективное рафинирование. Основу рафинирующей способности флюсов составляют  $MgCl_2$ ,  $MgF_2$ ,  $KCl$ . Рафинирующее действие флюсов основано на взаимодействии окиси магния с хлористым магнием и образованием хлорокиси магния ( $MgCl_2 \cdot 5MgO$ ). Хлорокись магния смачивается частицами флюса лучше, чем металлом. При опускании хлористых флюсов в металл происходит обволакивание окиси магния расплавами хлористых солей и высаживание этих агрегатирован-

ных комплексов на дно тигля. В то же время, флюс должен хуже смачивать металл для того, чтобы он отделялся от металла во время разливки и не затягивался в форму.

Разработано большое количество флюсов; составы некоторых из них приведены в таблице 2.4. Плавка магниевых сплавов может осуществляться с использованием 2-х флюсов: покровного и рафинирующего. В этом случае расплавление твердой шихты происходит под флюсом, который обеспечивает защиту расплава от воздействия атмосферы печи.

Затем покровный флюс снимается и наводится другой флюс для рафинирования. Понятно, что технология плавки с покровными и рафинирующими флюсами – более сложная, поэтому желательно использовать флюс одного состава.

*Таблица 2.4*

Составы флюсов для плавки магниевых сплавов

| Флюс   | Состав, %         |       |                   |                  |                   |       |                  |
|--------|-------------------|-------|-------------------|------------------|-------------------|-------|------------------|
|        | MgCl <sub>2</sub> | KCl   | CaCl <sub>2</sub> | CaF <sub>2</sub> | BaCl <sub>2</sub> | MgO   | AlF <sub>3</sub> |
| № 2    | 38-46             | 32-40 | < 10              | –                | 5-8               | < 1,5 | –                |
| Ви 2   | 38-46             | 32-40 | < 10              | 3-5              | 5-8               | < 1,5 | –                |
| Ви 3   | 30-40             | 25-36 | < 2               | 15-20            | –                 | 7-10  | –                |
| Фл 5-3 | 26                | 20-40 | –                 | 6-13             | 9                 | –     | 6-13             |

Флюсы № 2 и Ви 2 предназначены для плавки в стационарных тиглях. Флюс № 2 представляет в своей основе плавленный карналлит с добавлением хлористого бария в качестве утяжелителя. Добавка к флюсу № 2 плавикового шпата повышает вязкость флюса и поверхностное натяжение на границе металл – флюс, что способствует повышению рафинирующей способности.

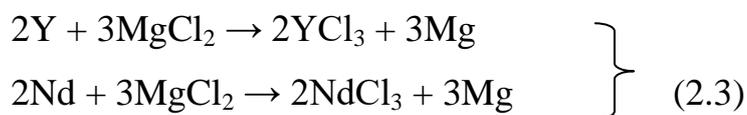
Флюс Ви 2 готовится путем размола флюса № 2 и фтористого кальция, просеивания их и смешивания в шаровой мельнице или смесителе. При плавке в стационарных тиглях можно использовать один флюс Ви 2.

Флюс Ви 3 отличается от Ви 2 меньшим содержанием карналлита,

более высоким содержанием плавикового шпата и наличием в составе до 10% окиси магния. Естественно, что флюс Ви 3 обладает более высокой вязкостью и применяется для плавки в выемных тиглях. На поверхности расплава образуется корка, которую легко удержать при разливке. В качестве основы для приготовления флюса Ви 3 служит плавеный карналлит, размолотый в шаровой мельнице, к которому добавляют окись магния и размолотый и просеянный фтористый кальций.

Флюс Фл 5-3 содержит еще меньшее количество хлористого магния и представляет собой смесь обезвоженного карналлита с обезвоженным техническим хлористым барием, плавиковым шпатом и фтористым алюминием. Применяется для приготовления сплавов высокой чистоты, в том числе сплавов, легированных цирконием и РЗМ.

При приготовлении магниевых сплавов с РЗМ на поверхности раздела расплав – хлористый флюс могут протекать обменные реакции между легирующими элементами и компонентами флюса:



В результате этих реакций наблюдаются большие потери дорогостоящих компонентов. Для уменьшения степени взаимодействия необходимо уменьшить содержание  $MgCl_2$  во флюсе, а в лучшем случае исключить его полностью.

Разработаны бесхлористые флюсы, составы которых приведены в таблице 2.5.

**Таблица 2.5**

**Составы бесхлористых флюсов**

| Флюс   | Состав, %        |                  |                  |                                  |                               |   |
|--------|------------------|------------------|------------------|----------------------------------|-------------------------------|---|
|        | CaF <sub>2</sub> | MgF <sub>2</sub> | AlF <sub>3</sub> | Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub> | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> |
| ВАМИ 1 | 3,5              | –                | 23,5             | 33,0                             | 40,0                          | –   |
| ВАМИ 5 | 17,5             | 17,5             | 15,0             | –                                | 50,0                          | –   |
| № 6    | –                | –                | –                | –                                | 15,0-20,0                     | 85,0-80,0                                     |

Составляющие этих флюсов, такие как  $AlF_3$ ,  $B_2O_3$ , термодинамически менее устойчивы, чем фториды и окислы магния и РЗМ, поэтому взаимодействуют с магнием и РЗМ. Правда, благодаря высокой вязкости из-за высокой температуры плавления, взаимодействие протекает с малой скоростью. Эти же причины приводят к тому, что эти флюсы имеют худшие защитные свойства, и если корка нарушается, то возможно загорание магния. Поэтому распространения эти флюсы не получили.

#### **2.4. Технологический процесс флюсовой плавки**

Вне зависимости от способа плавки (стационарные или выемные тигли или дуплекс-процесс) в технологии плавки имеется много общего. Поэтому перечислим последовательность операций, осуществляемых при плавке:

1. Перед первой плавкой стационарный или выемной тигель разогреваются до температуры темно-красного каления.
2. Стенки и дно тиглей присыпаются молотым флюсом (табл. 2.4); расплавляется около 1,0-1,5% флюса от массы шихты.
3. Производится загрузка и расплавление шихты. В первую очередь загружаются возврат, предварительные сплавы, готовые сплавы и свежие металлы. Лигатуры вводятся в последнюю очередь после доведения температуры до  $700-720^{\circ}C$  под зеркало расплава с помощью шумовки; загорание металла во время плавки устраняется путем присыпания очагов горения молотым флюсом.
4. Удаляют старый и наводят свежий флюс.
5. Производится рафинирование путем перемешивания сплава железной ложкой-шумовкой в течение 4-6 минут. Перемешивание заканчивается, когда поверхность расплава становится блестящей. Ложку-шумовку не следует опускать глубже, чем на  $2/3$  от поверхности металла, а движение осуществлять не просто вверх-вниз, а по схеме

«вниз-вперед-вверх». Во время рафинирования при необходимости подсыпают свежий флюс. Расход флюса при рафинировании составляет около 1% от массы шихты.

6. После рафинирования с поверхности расплава снимается шлак и старый флюс, наводится новый покров; в случае плавки сплавов с цирконием дается выдержка 10-15 минут, температура доводится до температуры заливки, отбираются необходимые пробы, производится разливка; в случае плавки сплавов системы Mg - Al - Zn при температуре 720-740° С производится модифицирование необожженным магнезитом (см. § 1.5). Продолжительность модифицирования составляет 8-12 мин. – до прекращения выделения пузырей на поверхности расплава.
7. Производится очистка расплава от шлака, образовавшегося в процессе модифицирования, зеркало металла засыпается новой порцией флюса.
8. Расплав выстаивается 10-15 мин., отбираются необходимые пробы, температура доводится до температуры литья.
9. Производится разливка сплавов.

## **2.5. Разливка сплавов**

Температура разливки в большинстве случаев не превышает 740-760° С, и только в отдельных случаях (крупные тонкостенные отливки) достигает 800° С. Процесс разливки различается в зависимости от способа плавки.

Если плавка производится в стационарных тиглях, то на участке должен находиться тигель с расплавленным флюсом № 2 или карналлитом, который служит для прогрева и очистки разливочных ковшей. Полная замена флюса в промывном тигле производится через 48 часов.

Разбор металла из стационарного тигля производится следующим

образом: по достижении нужной температуры сплава прогревают разливочный ковш в тигле с флюсом докрасна, сливают флюс через носок ковша обратно во флюсовый тигель и тщательно стряхивают остатки флюса с ковша. Отводят донной частью ковша флюс с поверхности расплава и, медленно погружая ковш в расплав, набирают сплав. Сливают до 5% сплава обратно для того, чтобы удалить флюс, находящийся в носке ковша. Затем вынимают ковш со сплавом и дают стечь флюсу с его наружной поверхности. При необходимости, если флюс на поверхности металла в тигле не успевает затянуть нарушенный покров, присыпают зеркало металла свежим флюсом тонким слоем. При разборе металла нужно как можно меньше взбалтывать расплав в тигле и не следует вычерпывать более  $2/3$  его от емкости тигля.

Ковш с металлом подносят к форме, при необходимости проверяют температуру расплава и, равномерно наклоняя ковш, ведут заливку формы. Необходимо как можно ближе держать носок ковша к литниковой чаше или воронке, держа их заполненными в течение всего времени заливки. Струю металла во время заливки припыливают серным цветом или смесью серы и борной кислоты (в соотношении 1:1) из мешочка из неплотной ткани.

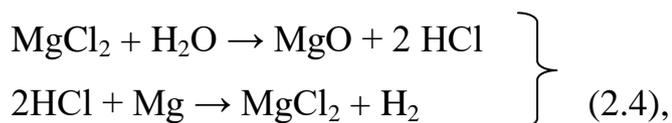
По окончании заливки формы в ковше должно остаться не менее 15% металла от его емкости. Остатки металла сливают в изложницу.

При работе с выемным тиглем при достижении необходимой температуры тигель вынимают из печи и переносят к месту заливки. Если при этом нарушается корка флюса, то очаги загорания тушатся смесью серы и борной кислоты. Не следует тушить очаги загорания свежей порцией флюса, т. к. последний, не успев загустеть, может попасть в отливку. Когда температура металла в тигле становится равной температуре заливки, тщательно очищают носок тигля от флюса, отводят корку флюса счищалкой от носка тигля, поднимают тигель и, осторожно на-

клоняя его к литниковой чаше или воронке, начинают заливку. Необходимо при этом припыливать струю серным цветом или смесью серы и борной кислоты и держать чашу или воронку все время заполненными. В случае заливки нескольких форм при переносе тигля от одной формы к другой следует оставлять его в наклонном положении, оставшемся после заливки предыдущей формы, чтобы исключить повреждение флюсовой корки. По окончании заливки в тигле должно оставаться не менее 15% жидкого металла от емкости тигля.

Технология флюсовой плавки имеет существенные недостатки:

1. Неблагоприятное влияние испаряющихся флюсов на здоровье работающих и экологическую обстановку цеха.
2. Большой возврат металла в виде сливов из ковшей для последующего переплава, что влечет за собой потери металла, рабочего времени и энергетические затраты.
3. Коррозия металлического оборудования в цехе (металлические корпуса печей, краны и подкрановые пути и др.).
4. Возможность попадания флюса в отливку и развитие флюсовой коррозии отливок, механизм которой заключается в следующем:



и т. д.

На отливке появляются очаги коррозии, которые, разрастаясь со временем, приведут к разрушению отливки.

Для обнаружения флюсовой коррозии отливки выдерживают в течение 48 часов в туманных камерах, в которых содержание водяных паров близко к 100%, затем проводится визуальный контроль. Отливки с очагами флюсовой коррозии бракуются.

## 2.6. Бесфлюсовая плавка магниевых сплавов

Технология бесфлюсовой плавки основана на повышении защитных свойств поверхностных пленок, образующихся на расплаве благодаря введению в состав атмосферы активных по отношению к магнию газов.

Наилучшие результаты достигаются при введении в атмосферу печи гексафторида серы ( $SF_6$ ), который представляет собой тяжелый газ (в 5 раз тяжелее воздуха), без цвета и запаха. Он нашел широкое применение в высоковольтной электротехнике, где используется, в частности, как среда для погашения дуги при высоковольтном разряде. Также он используется как диэлектрик в качестве основной изоляции для высоковольтных измерительных трансформаторов тока и напряжения и др.

В связи с таким его использованием он называется «элегаз».

Благодаря высокой плотности, уже малые концентрации его осаждаются на поверхности расплава, вытесняя воздух. При этом образуется пленка, состоящая из сульфидов и фторидов магния, которая имеет критерий Пиллинга и Бедворта больше единицы и обладает хорошими защитными свойствами. Достаточно небольшой добавки  $SF_6$  (до 0,2-0,5%) в смесь с воздухом, углекислым газом или азотом, чтобы надежно защитить расплав от загорания.

Для бесфлюсовой плавки магниевых сплавов разработано специальное оборудование, включающее индукционные и раздаточные печи РПБМ-0,25, РПБМ-0,5 и РПБМ-1,0. В качестве защиты от окисления используют элегаз в смеси с осушенным воздухом в соотношении 1:100 и в смеси с углекислым газом в соотношении 1:15.

Расход защитных газов устанавливается в зависимости от герметичности и объема печи и поддерживается на уровне:

| Тип смеси | Расход, литров/час |                  |                |
|-----------|--------------------|------------------|----------------|
|           | Элегаз             | Осушенный воздух | Углекислый газ |
| № 1       | 3-5                | 300-500          | –              |
| № 2       | 3-5                | –                | 45-75          |

Расход газов на тонну расплава составляет: элегаз – около 20 литров (130 граммов), углекислый газ – около 300 литров (600 граммов).

Модифицирование сплавов Mg - Al - Zn рекомендуется производить путем продувки фреоном (~ 5 мин.), расход которого составляет примерно 50 литров в минуту (230 граммов), или обработкой гексахлорэтаном. После модифицирования необходимо производить рафинирование путем продувки расплава гелием или аргоном.

При дуплекс-процессе может применяться следующая технология. В плавильную печь на дно тигля помещается углеродистый материал (кокс, графит), затем производится расплавление металла. В процессе разлива по выемным тиглям, предварительно продутым SF<sub>6</sub>, металл фильтруется через раскаленный углеродистый фильтр. Кроме того, при дуплекс-процессе плавка в индукционной печи может происходить под покровом флюса. Тогда модифицирование можно производить MgCO<sub>3</sub>.

При производстве фасонного литья элегаз может применяться при плавке в тиглях, дуплекс-процессе и при бесфлюсовой разливке при литье под давлением.

Способ бесфлюсовой плавки в защитных средах позволяет осуществлять механизированную разливку с помощью магнитодинамических устройств, что может оказаться наиболее эффективным при литье в кокиль и под давлением.

Применение бесфлюсовой плавки обеспечивает следующие преимущества:

1. Сокращается цикл плавки, повышается производительность труда и качество отливок.
2. Существенно уменьшаются потери металла.
3. Исключается флюсовая коррозия отливок.
4. Уменьшается коррозия подкрановых путей цеха и металлических корпусов печей.

5. Улучшаются санитарно-гигиенические условия труда.

По поводу последнего преимущества необходимо сказать, что уже небольшие добавки флюса ухудшают защитное действие среды и санитарно-гигиеническую обстановку.

В газовой фазе над расплавом появляются угарный газ (~ до 1,5%) и пары фтористого водорода (HF). Концентрация его в присутствии флюса может достигать при высокой температуре расплава до  $200 \cdot 10^{-4}\%$ . Предельно допустимая концентрация составляет  $3 \cdot 10^{-4}\%$ . В отсутствие флюса содержание HF над расплавом не зависит от концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{SF}_6$  в смеси и зависит только от температуры. При температуре  $700^\circ\text{C}$  содержание HF соответствует  $(30-40) \cdot 10^{-4}\%$ , а при  $760^\circ\text{C}$  достигает до  $60 \cdot 10^{-4}\%$ . Это содержание также во много раз превышает ПДК, но в несколько раз меньше, чем при наличии флюса. В связи с этим должно обеспечиваться надежное вентилирование околочного пространства.

### **ГЛАВА III. ФОРМОВОЧНЫЕ И СТЕРЖНЕВЫЕ СМЕСИ**

Фасонное литье из магниевых сплавов производится всеми известными способами : в песчаные формы (в том числе из жидкоподвижных и химически твердеющих смесей), в оболочковые формы, по выплавляемым моделям, в кокиль и под давлением.

Выбор способа литья определяется технологическими возможностями процесса, массой и геометрией отливок, серийностью производства и требованиями, предъявляемыми к отливкам.

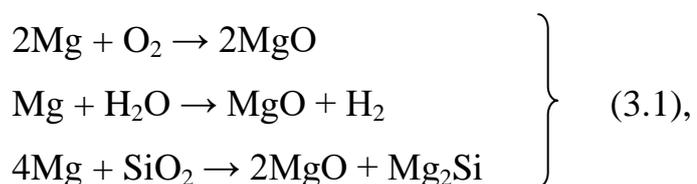
Высокие скорости охлаждения, характерные для литья в кокиль и под давлением, создают предпосылки для быстрого образования в затвердевающей отливке твердой корки металла, а отсутствие газотворности и газопроницаемости формы предотвращают загорание залитого в формы металла.

Охлаждение металла в графитовых формах происходит тоже достаточно быстро, а на границе металла с формой в порах формовочной смеси создается восстановительная атмосфера, поэтому загорание сплава не происходит.

Во всех этих случаях достаточно припыливать поверхность формы перед заливкой и струю расплава во время литья серным цветом.

Иначе обстоит дело при литье в песчаные формы. Невысокие скорости охлаждения приводят к тому, что время затвердевания возрастает в десятки раз. В это время в пограничном слое формы происходит интенсивный перенос кислородсодержащих газообразных компонентов из периферийных слоев формы к поверхности отливки. В результате диффузии кислорода и водяного пара газовая фаза на границе раздела металл – форма приобретает окислительные свойства; сплав загорается.

Кремнезем, являющийся огнеупорной основой большинства формовочных и стержневых смесей, поддерживает горение. Происходят реакции



которые приводят к полному сгоранию металла.

Для предупреждения загорания сплавов в формовочные и стержневые смеси на основе кремнезема вводятся специальные противозагарные добавки.

В песчано-глинистые смеси вводят защитную присадку ВМ, в холднотвердеющих смесях и смесях для оболочковых форм применяют борфторид аммония ( $\text{NH}_4\text{BF}_4$ ). В стержневые смеси вводят серу и борную кислоту.

Хотя механизм защитного влияния борфторида аммония выяснен не до конца, можно утверждать, что он имеет много общего с механизмом защитного влияния присадки ВМ, которая применяется более широко.

### 3.1. Защитное влияние присадки ВМ и составы формовочных смесей

Присадка ВМ содержит:

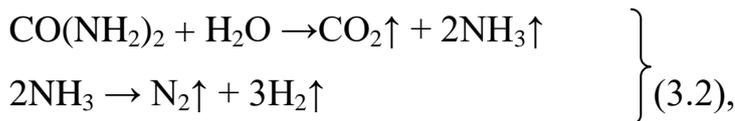
- борную кислоту  $\text{H}_3\text{BO}_3$ .....(13-17)%
- мочевины  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ .....(55-62)%
- нефелиновый коагулянт  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ .....(15-19)%

По данным дериватографического анализа, при нагреве при температуре  $(130-230)^\circ\text{C}$  теряется примерно 40% массы присадки ВМ и при температуре  $(230-300)^\circ\text{C}$  – еще около 30%. Поэтому при применении присадки ВМ формы не должны подвергаться высокотемпературной сушке.

В первые моменты заливки, когда поверхностные слои формы еще не прогрелись до указанных температур, защита металла от загорания осуществляется путем припыливания литниковых каналов и прибылей серным цветом, а поверхность сухих стержней окрашивается защитной краской.

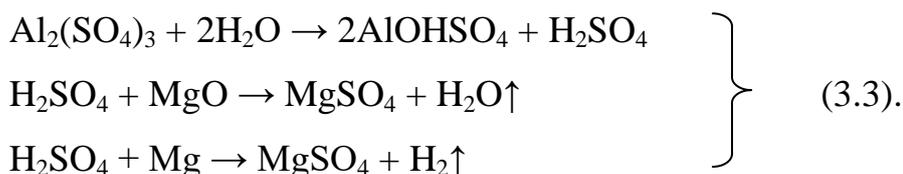
После прогрева формы происходят реакции:

1. Разложение мочевины:



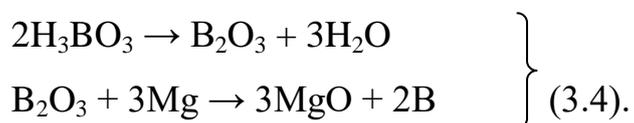
в результате чего происходит связывание водяных паров, выделяющихся при прогреве формы, и уменьшение кислорода в форме за счет разбавления воздушной среды формы углекислым газом, аммиаком, азотом и водородом.

2. Гидролиз сернокислого алюминия и взаимодействие продуктов гидролиза с окисью магния и магнием:



В результате также происходит связывание влаги и уменьшение окислительного потенциала газовой среды в форме.

3. Разложение борной кислоты и восстановление борного ангидрида до бора, который внедряется в поверхностные слои отливки, уплотняя их:



Таким образом, защитное действие присадки ВМ складывается из 3 факторов:

1. Связывания паров воды и уменьшения окислительного потенциала газовой среды в полости формы.
2. Образования на поверхности металла плотных пленок из сульфатов магния.
3. Восстановления бора из борного ангидрида и внедрения его в поверхностный слой отливки.

Содержание добавки ВМ зависит от влажности формовочной смеси. Для уменьшения добавки необходимо применять формовочные смеси с минимальной влажностью. В большинстве случаев содержание ВМ в формовочной смеси составляет (4-7)% и только для крупных отливок массой более 300 кг и толщиной стенок более 30 мм содержание добавки ВМ в составе формовочной смеси может достигать до 9%. Введение в формовочную смесь до (0,5-1,0)% диэтиленгликоля позволяет снизить влажность формовочных смесей.

В зависимости от организации технологического процесса и масштабов производства в литейном цехе магниевого литья могут применяться 3 типа смесей: единая, облицовочная, наполнительная.

Технологически и организационно проще применять единую формовочную смесь, для приготовления свежих составов которой используют:

1. просушенные непросеянные кварцевые или тощие пески (ГОСТ 2138-91);

2. просушенные, размолотые и просеянные глины формовочные огнеупорные (ГОСТ 3226-93), в количестве (5-7)% при использовании кварцевых песков и (1-3)% при использовании тощих песков;
3. просеянная присадка ВМ;
4. вода в количестве (4,5-5,5)%.

После каждого цикла оборота единая формовочная смесь освежается на (3-10)%.

Приготовление смеси сводится к подготовке свежих материалов, загрузке в бегуны или смеситель материалов в следующей последовательности: оборотная смесь, присадка ВМ, свежие пески, глина (бентонит в порошке или в виде водного раствора), вода до нормы. Защитную присадку вводят из расчета: на свежие пески – 100% от нормы, положенной по составу; на оборотную смесь – 0,5% при литье отливок массой до 100 кг и 1,0% при литье отливок массой свыше 100 кг. Корректировка содержания присадки ВМ осуществляется по результатам химического анализа, проводимого не реже одного раза в неделю.

Облицовочную смесь применяют в том случае, когда имеющееся в цехе оборудование не позволяет переработать всю оборотную формовочную смесь или когда по каким-то причинам невозможно работать на единой формовочной смеси. Приготовление облицовочной смеси осуществляется на свежих материалах в соответствии с заданным составом. Количество облицовочной смеси составляет 10-25% от общей массы смеси.

Переработка наполнительной смеси складывается из операций: просеивание оборотной формовочной смеси → увлажнение до нормы → перемешивание примерно 5 минут → вылеживание в течение 2-4 часов → разрыхление → просеивание через сито с размером ячеек 20×10 мм. Освежение смеси в случае применения облицовочных смесей не требуется.

### 3. 2. Составы стержневых смесей

Повышение прочности стержней за счет сушки их при температуре выше  $130^{\circ}\text{C}$  не позволяет использовать добавку ВМ в качестве защитной присадки ввиду ее разложения. Поэтому в стержневые смеси в качестве защитных добавок вводятся сера и борная кислота. Защитное действие их сводится к следующему. Сера, температура плавления которой равняется  $(112-119)^{\circ}\text{C}$  при сушке стержня расплавляется, а при охлаждении его кристаллизуется. При более высоком нагреве под влиянием температуры залитого металла происходит повторное расплавление и испарение серы. Ниже приводятся значения упругости паров серы при различных температурах:

|                                 |     |      |      |
|---------------------------------|-----|------|------|
| Температура, $^{\circ}\text{C}$ | 242 | 341  | 379  |
| Упругость паров, кПа            | 1,1 | 14,1 | 33,3 |

которые показывают, что при температуре около  $380^{\circ}\text{C}$  парциальное давление паров серы может достигать до трети атмосферного давления. Пары серы при взаимодействии с кислородом окисляются до сернистого ангидрида  $\text{SO}_2$ , который, будучи в 2,7 раза тяжелее воздуха, разбавляет газовую среду формы на границе контакта металла со стержнем и делает ее менее реакционноспособной по отношению к металлу. В присутствии кислорода сернистый ангидрид окисляется до серного ангидрида ( $\text{SO}_3$ ). Последний, взаимодействуя с влагой, образует серную кислоту. Серная кислота, соединяясь с магнием, образует сульфаты магния, находящиеся на поверхности металла.

Борная кислота разлагается с образованием в конечном итоге элементарного бора, который уплотняет поверхностную пленку. Таким образом, защитное действие серы и борной кислоты сводится к тем же факторам, как и защитное действие добавки ВМ.

Защитное влияние пленок, образующихся на границе сплава с формой, зависит от состава пленки, который определяет величину кри-

терия Пиллинга и Бедворта (отношение объема образовавшейся пленки к объему металла, израсходованного на образование этой пленки). В таблице 3.1 приведены критерии Пиллинга и Бедворта ( $\alpha = \frac{V_{\text{пленки}}}{V_{\text{Mg}}}$ ) для некоторых соединений магния.

**Таблица 3.1**

Критерий Пиллинга и Бедворта для некоторых соединений магния

| № п/п | Реакция   | $\alpha$ |
|-------|---|----------|
| 1     | $2\text{Mg} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{MgO}$                             | 0,71     |
| 2     | $3\text{Mg} + \text{N}_2 \rightarrow \text{Mg}_3\text{N}_2$                   | 0,79     |
| 3     | $\text{Mg} + \text{S} \rightarrow \text{MgS}$                                 | 1,29     |
| 4     | $3\text{Mg} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{MgS} + 2\text{MgO}$               | 0,92     |
| 5     | $3\text{Mg} + \text{BF}_3 \rightarrow 3\text{MgF}_2 + 2\text{B}$              | 1,32     |
| 6     | $3\text{MgO} + 2\text{BF}_3 \rightarrow 3\text{MgF}_2 + \text{B}_2\text{O}_3$ | 3,1      |

Из таблицы видно, что фтористые соединения магния в сочетании с бором дают наибольший защитный эффект. Этим и объясняется тот факт, что в некоторых случаях, например, в гипсовых смесях или смесях для оболочковых форм, применяют борфторид аммония ( $\text{NH}_4\text{BF}_4$ ). Недостатком борфторида аммония является то, что он разлагается с образованием фтористого бора при достаточно высоких температурах (380-390° С).

При литье цветных сплавов принято делить стержни на 3 группы:

1. К первой группе относятся стержни, выполняющие внутренние полости отливок, которые кругом обливаются металлом и недоступны для механической обработки. Удаление газов затруднено и осуществляется только через знаки малых размеров. Поэтому стержневые смеси должны иметь низкую газотворность, высокие выбиваемость и газопроницаемость.
2. Ко второй группе относятся стержни, выполняющие внутренние полости, доступные для осмотра и подвергаемые механической обработке. В этих стержнях газы могут легко удаляться через массивные

знаки. При изготовлении и сушке стержни должны сохранять размеры, обладать общей и поверхностной прочностью, легко выбиваться из отливки и иметь высокую газопроницаемость.

3. К третьей группе относятся стержни различной конфигурации, выполняющие наружные очертания отливки. Поверхность соприкосновения с металлом у стержней 3-ей группы меньше, чем у первых двух. Они легко выбиваются, а удаление образующихся в стержнях газов происходит свободно.

Для каждой группы стержней в справочной литературе приводятся типовые составы стержневых смесей. Для I группы применяются смеси только из кварцевых песков, которые содержат не более 0,5% глины, и преимущественно с масляными связующими. В эти смеси вводится небольшое количество серы (не более 0,5%).

Для второго класса стержней могут применяться кварцевые пески с небольшим количеством тощих песков (до 10%). В эти смеси вводится более высокое содержание серы (0,5-1%).

Стержни III группы позволяют использовать в смеси до 50% тощих песков, а иногда добавлять в смеси до 50% отходов стержневых смесей, полученных размолотом бракованных стержней.

В качестве связующих для стержней II и III классов применяют органические – как нерастворимые в воде (масляные), так и растворимые (М-3, КБЖ, КБТ, КМц) связующие. Все стержневые смеси II и III групп содержат от 0,2 до 0,5% борной кислоты.

Приготовленные стержневые смеси должны удовлетворять свойствам, представленным в таблице 3.2.

Для склеивания, окраски стержней и заделки поврежденных мест и швов применяются клеи, краски и пасты. Отличительная особенность их, по сравнению с аналогичными материалами для других сплавов, заключается в том, что они содержат добавки, уменьшающие окисление

магниевого сплава. Такими добавками является борфторид калия или борная кислота.

**Таблица 3.2**

Основные свойства стержневых смесей для магниевого литья

| № п/п | Показатель  | Группа стержней |             |             |
|-------|---|-----------------|-------------|-------------|
|       |   | I               | II          | III         |
| 1     | Газопроницаемость в сыром состоянии, не менее     | 100,0           | 80,0        | 60,0        |
| 2     | Влажность, %                                      | 2,0-5,0         | 2,5-5,5     | 2,5-5,5     |
| 3     | Предел прочности на сжатие в сыром состоянии, МПа | 0,003-0,007     | 0,006-0,015 | 0,006-0,015 |
| 4     | Предел прочности на разрыв в сухом состоянии, МПа | 0,4-0,8         | 0,4-0,8     | 0,5-1,0     |

Рецептура этих материалов приводится в справочной литературе.

Например, для получения поверхности отливки с низкой шероховатостью применяют для натирки стержней пасту следующего состава:

молотый тальк – 90-93%;

формовочная глина – 2-5%;

борная кислота – 5%;

вода (сверх 100%) – 30-40%.

#### **ГЛАВА IV. ЛИТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ, ПРИБЫЛИ И ХОЛОДИЛЬНИКИ**

Литниковая система по ГОСТ 18169-86 представляет собой систему каналов и устройств подвода в определенном режиме жидкого металла к полости литейной формы, отделения неметаллических включений и обеспечения питания отливки при затвердевании.

Элементы литниковой системы можно подразделить на подводящие и питающие.

Быстрое затвердевание подводящих элементов не обеспечивает полу-

чение отливкой полноценного питания и формирования ее без усадочных дефектов.

Для компенсации усадки сплава в период затвердевания, предупреждения образования усадочных раковин и пористости служит питающий элемент литниковой системы – прибыль, представляющий собой добавочную полость в литейной форме, которая заполняется жидким металлом.

#### **4.1. Течение расплава в литниковой системе и форме.**

##### **Конструктивные особенности элементов литниковой системы**

Заполнение формы металлом можно разделить на несколько этапов:

1. Движение расплава из выемного тигля или разливочного ковша в литниковую воронку или чашу и движение металла в полости чаши.
2. Движение сплава по элементам литниковой системы.
3. Движение сплава в полости формы.

Заполнение литниковой чаши или воронки производится открытой струей. Расплав в этот период интенсивно окисляется, и возможно загорание магниевых сплавов. Поэтому перед заливкой производится припыливание поверхности воронок, чаш и открытых прибылей серным цветом. Струя металла во время заливки также припыливается серным цветом.

Свободно падающая струя при ударе о дно чаши резко затормаживается и теряет скорость. Давление под струей у дна чаши или формы повышается, и расплав растекается по дну чаши. При подходе к боковым стенкам чаши струя вновь затормаживается, возникает подпор, и расплав переливается с более высокого уровня на более низкий в направлении к падающей струе. При этом возможно разбрызгивание расплава, захват им воздуха, окисление и образование шлака.

Эти отрицательные явления происходят тем в большей степени, чем больше мощность падающей струи, которую можно определить по формуле:

$$N = \frac{mV^2}{2\tau} = \frac{Q \cdot \rho \cdot V^2}{2} = \frac{F \cdot \rho \cdot V^3}{2} = \frac{F \cdot \rho \cdot \mu^3 \sqrt{2gH}}{2} \quad (4.1),$$

где  $m$  – масса струи;  $\tau$  – время падения струи;  $V$  – скорость движения струи;  $F$  – площадь поперечного сечения струи;  $\mu$  – коэффициент расхода;  $H$  – высота падения струи.

Мощность струи увеличивается с увеличением сечения и высоты падения. Для уменьшения ее следует держать носок ковша или выемного тигля как можно ближе к поверхности чаши.

При значительной циркуляции металла в чаше может образоваться вихревое движение с вертикальной осью вращения, которое приводит к возникновению вихревой воронки при выходе металла из чаши в стояк.

Всю жидкость, вращающуюся в чаше, можно рассматривать как вращающуюся вихревую трубку. В вихревой трубке произведение угловой скорости в каком-то ее сечении на площадь поперечного сечения есть величина постоянная, называемая интенсивностью вихревой трубки, т. е.:

$$\omega_1 \cdot F_1 = \omega_2 \cdot F_2 = \text{const} (c) \quad (4.2),$$

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – угловые скорости в сечениях  $F_1$  и  $F_2$  (в сечениях чаши и стояка, например).

Так как  $\omega = \frac{V}{r}$ , то интенсивность вихревой трубки можно выразить как  $\omega \cdot F = \frac{V}{r} \cdot \Pi r^2 = c$ , и  $V = \frac{c}{r}$ .

Отсюда следует, что окружная скорость на различных линиях тока обратно пропорциональна радиусу. Поэтому вращательное движение жидкости у стенок чаши, имеющее малую скорость, может иметь большую скорость у входа в стояк. Металл под влиянием центробежных сил будет отбрасываться к стенкам стояка, возникнет вихревая воронка. Если вершина конуса достигает дна чаши и входа в стояк, в него начинает засасываться воздух и шлак. Бороться с этим явлением можно путем увеличения объема чаши, уменьшения диаметра стояка и повышением

уровня металла в чаше.

Для магниевого литья разработаны конструкции и размеры чаш для мелкого (массой до 8 кг), среднего (массой от 8 до 50 кг) и крупного (более 50 кг), которые можно найти в справочной литературе. Чаши формируют из стержневой смеси, реже делают литыми из чугуна. Рекомендуемая емкость чаш составляет (в % от массы отливки):

мелкое литье.....20-30;

среднее литье.....30-40;

крупное литье.....40-50.

Для крупного, а иногда и для среднего литья рекомендуется применять стопорные пробки, изготовленные из чугуна (выемные) или из магниевого сплава (расплавляемые), которые позволяют заполнить чашу раньше, чем металл начинает поступать в стояк. Таким образом создаются условия для поддержания в стояке положительного давления во все время заливки.

Стопорные пробки в виде дисков из магниевых сплавов или из чистого магния заделывают в чаше в специальное углубление над входной воронкой. Толщину диска можно выбирать из соотношения, что требуемое время на расплавление диска составляет 2 с на 1 мм толщины.

Следующий элемент литниковой системы – стояк – должен быть сужающимся. При движении сплава в цилиндрическом стояке по всей его высоте образуется разрежение, которое тем больше, чем больше высота стояка. При достаточно высоком разрежении в стояке может произойти срыв струи, т. е. расплав будет вытекать из чаши, не касаясь стенок стояка из-за прорыва воздуха и газов в разреженное пространство.

Уменьшить скорость движения сплава, а, следовательно, и разрежение в стояке можно путем плавного сопряжения стояка с чашей и увеличением гидравлических потерь. С этой целью делают стояки малых сечений, заменяют круглые стояки на прямоугольные, вместо вер-

тикальных применяют наклонные и зигзагообразные.

На рис. 4.1 приводятся сечения стояков, а на рис. 4.2 – профили стояков, применяемых для магниевого литья.

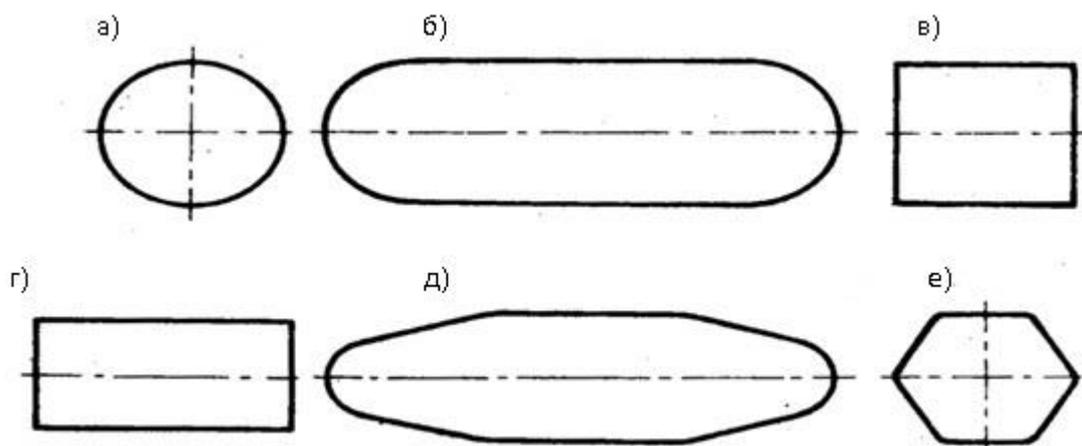


Рис. 4.1. Сечения стояков: а – круглые, б – овальные, в – квадратные, г – прямоугольные, д и е – многоугольные.

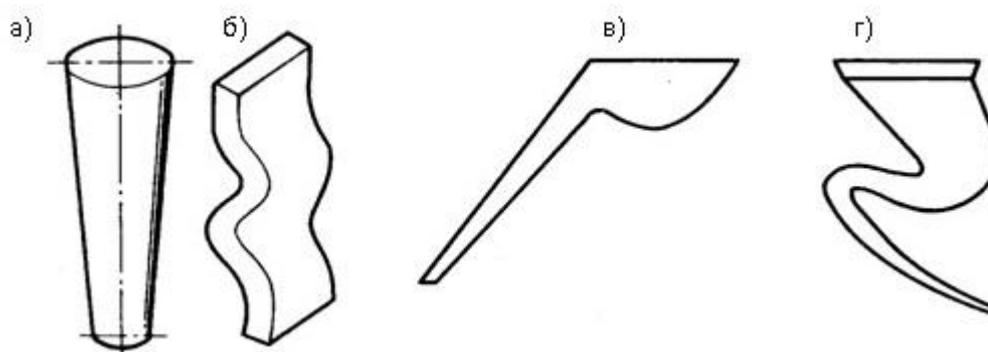


Рис. 4.2. Профили стояков: а – прямой, б – змееобразный, в – наклонный, г – наклонный («гусиная шейка»)

Все эти мероприятия направлены на то, чтобы в стояке не происходило окисление металла и образование шлаковых включений. В то же время, стояк полностью «промывается» расплавом, и те включения, которые попали в него из чаши, уносятся в следующие элементы литниковой системы.

Наибольшие возмущения в потоке образуются в месте выхода металла из стояка. В этом месте металл сталкивается с дном формы, меняет направление и начинает поступать в коллектор. Следовательно,

конструкция этого участка должна способствовать смягчению удара о дно стояка, уменьшению вихреобразования, окисления и образования шлаков. Существует много конструкций этого участка литниковой системы (рис. 4.3), но наиболее удачными, по всей видимости, являются «д», «ж», «и», «к», «м», «н», «п», «с», которые позволяют вводить расплав в коллектор снизу вверх, что создает дополнительные гидравлические сопротивления и способствует снижению скорости потока.

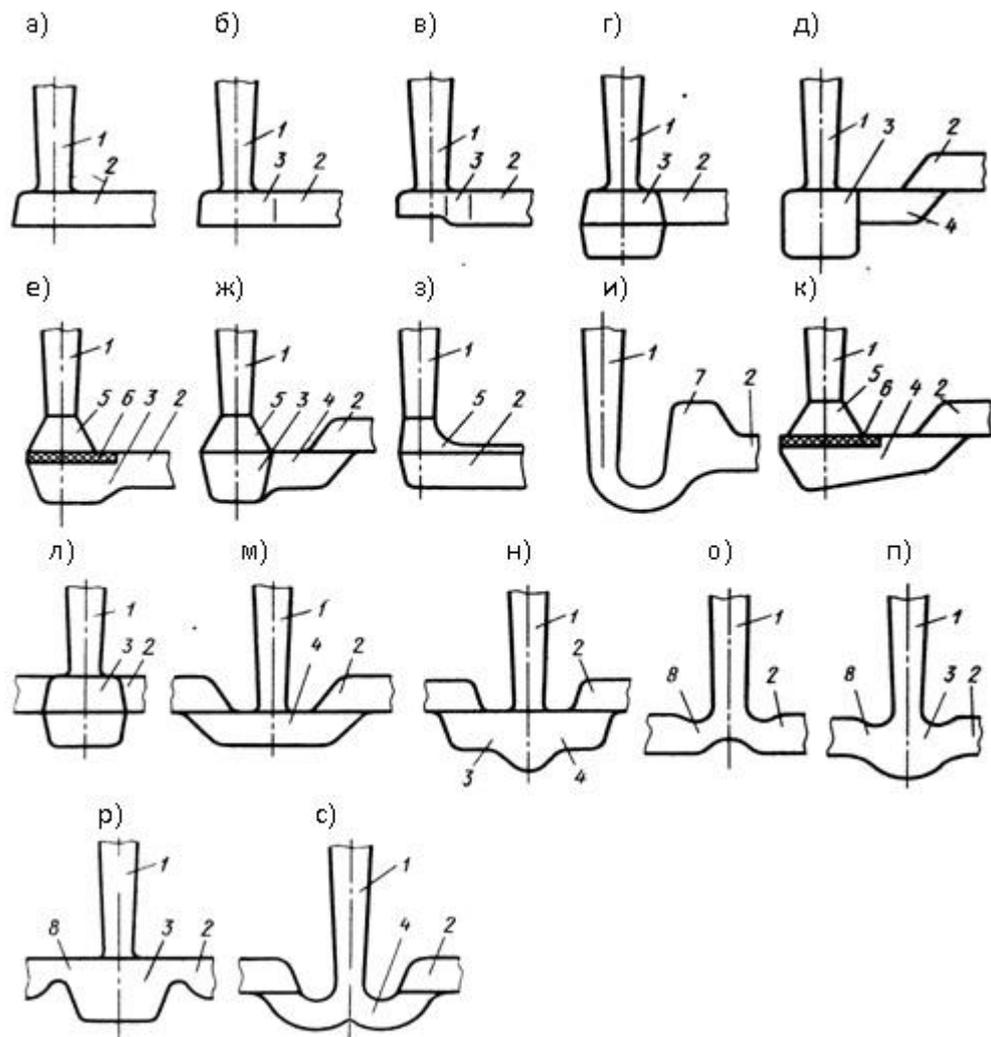


Рис. 4.3. Конструкции начальных участков литниковых систем:  
 1 – стояк; 2 – литниковый ход; 3 – зумпф; 4 – металлоприемник;  
 5 – расширение в нижней части стояка; 6 – фильтровальная сетка;  
 7 – шлакоуловитель; 8 – дроссель.

В системе «и» над коллектором предусмотрен шлакоборник, по-

звolyющий задерживать шлак. В системах «е», «к» предусматривается расширение нижнего основания стояка, предназначенного для установки сеток из листового железа толщиной 0,3-0,5 мм и размером ячейки диаметром 2-3 мм.

Диаметр разделки стояка под сетку определяется по таблицам в зависимости от площади поперечного сечения стояка и металлостатического напора.

Элементом литниковой системы, в котором возможно эффективное задержание шлаковых включений, является коллектор. Коллектор должен выполнить 2 задачи:

1. не допустить затекания расплава с окисленной поверхностью в питатель в первый момент заливки, когда коллектор еще не заполнен;
2. дать возможность шлаковым и флюсовым включениям в заполненном коллекторе всплыть до подхода металла к питателям.

Решение первой задачи обеспечивается установкой тонких питателей (4-8 мм), сопряженных с нижней частью коллектора. Вторая задача решается расположением первого питателя на некотором расстоянии от стояка, которое, по данным Н. М. Галдина, для магниевых сплавов (при скорости всплытия шлаковой частицы, равной 0,069 м/с) определяется из выражения:

$$l_{\text{п}} \geq 17,4 h_{\text{к}} \cdot V_{\text{к}} \quad (4.3),$$

где  $h_{\text{к}}$  – высота коллектора,  $V_{\text{к}}$  – скорость потока в коллекторе.

Чтобы шлаковые частицы, находящиеся в верхней части коллектора, не попали в питатель, необходимо, чтобы высота коллектора в несколько раз превышала толщину питателей. Нельзя размещать питатели в самом конце коллектора.

Для замедления скорости потока питатели располагают чаще всего под прямым углом к коллектору, обеспечивая плавное сочленение их с коллектором.

В полость формы сплав может поступать из питателей, которые располагаются выше, на уровне или ниже уровня основания формы.

Если питатель располагается выше основания формы, то часть времени или все время расплав падает вниз или стекает по стенке формы открытой струей. При этом происходит интенсивное окисление металла и образование вторичных шлаков.

Если расплав подводится в полость формы из питателей, примыкающих к нижнему ее основанию, то решающее значение имеет начальный период заполнения. В случае чрезмерно высокой скорости заполнения может наблюдаться фонтанирование и разбрызгивание сплава. Исключить это явление можно путем уменьшения скорости поступления металла в полость формы за счет увеличения сечения питателей.

Металл в полость должен поступать ламинарным потоком или потоком с допустимой степенью турбулентности. Так как по мере продвижения металла от стояка к полости формы возрастают возмущения в потоке, то необходимо уменьшать скорость течения расплава, для чего используются расширяющиеся литниковые системы.

#### **4.2. Типы литниковых систем**

Для магниевого литья могут применяться типы литниковых систем, показанные на рис. 4.4.

Верхняя литниковая система обеспечивает хорошую заполняемость при кратчайшем пути металла до формы, создает наиболее благоприятные условия для последовательно-направленной кристаллизации отливки снизу к прибылям. Она требует наименьшего расхода металла, легко удаляется при обрубке литья.

Основной недостаток – трудность обеспечения спокойного поступления металла в форму и исключения замешивания шлаков в отливку.

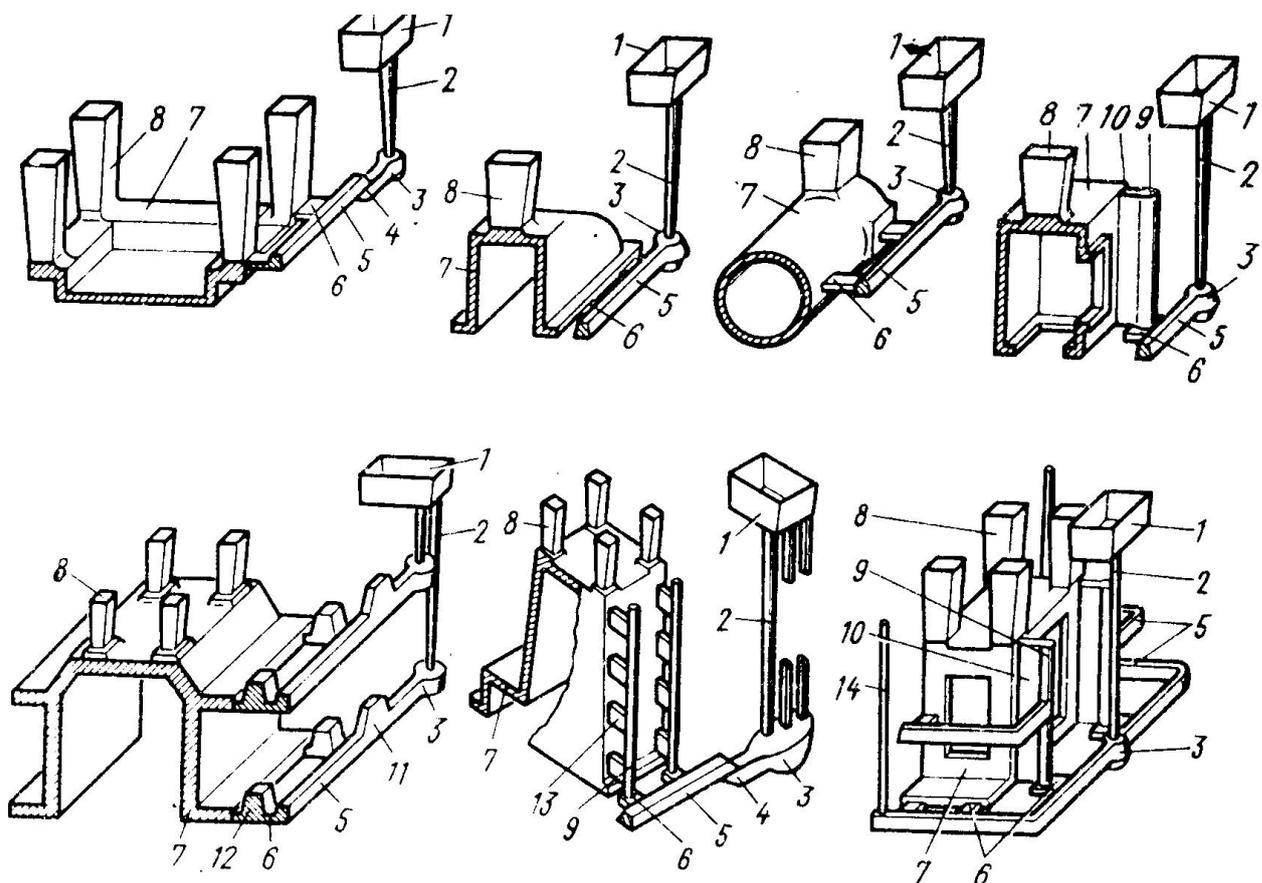


Рис. 4.4. Типы литниковых систем:

- а – верхняя, б – нижняя, в – боковая (по разъему), г – вертикально-щелевая,  
 д – ярусная с горизонтально расположенными питателями,  
 е – ярусная с вертикально расположенными питателями,  
 ж – комбинированная;

- 1 – чаша, 2 – стояк, 3 – зумпф, 4 – металлоприемник (промежуточный канал),  
 5 – коллектор, 6 – питатель горизонтальный, 7 – отливка, 8 – прибыль,  
 9 – колодец (обратный стояк), 10 – вертикальная щель, 11 – шлакосборник,  
 12 – питающая бобышка, 13 – питатель вертикальный, 14 – выпор.

Нижняя литниковая система обеспечивает спокойное поступление металла в форму без окисления, разбрызгивания и образования вторичных шлаков и способствует задержанию включений, проникающих из стояка. Она обеспечивает последовательное удаление воздуха из полости формы.

Однако из-за перегрева нижних слоев формы может расстроиться тепловой режим, нарушив направленность затвердевания. Это, в свою

очередь, может привести к образованию в отливке усадочных дефектов. При нижней литниковой системе трудно обеспечить заполняемость протяженных тонкостенных отливок.

Вертикально-щелевая система, обладая достоинствами нижней литниковой системы, создает хорошие условия для заполнения тонкостенных отливок и лучший тепловой режим.

К недостаткам следует отнести сложность выполнения ее в форме и удаления от отливки.

Ярусная литниковая система обеспечивает спокойное заполнение формы и создание правильного теплового режима. Недостаток ее – сложность изготовления, так как требуется наличие нескольких горизонтальных разъемов формы.

Комбинированная литниковая система совмещает одновременно несколько типов систем. Эту систему применяют для заливки крупногабаритных отливок сложной конфигурации в песчаных формах. Недостаток – сложность выполнения и удаления ее при обрубке.

Боковая литниковая система обеспечивает заполнение нижней части формы сверху, а верхней – снизу; соответственно, сочетает преимущества и недостатки этих литниковых систем.

Чаще всего используются верхняя, нижняя и вертикально-щелевая литниковые системы.

Выбор той или иной литниковой системы для конкретной отливки определяется ее массой, габаритными размерами и положением отливки в форме. Для отливок из магниевых сплавов, для которых определено положение их в форме, выбор типа литниковой системы может производиться по номограмме (рис. 4.5). Несмотря на то, что номограмма разрабатывалась для сплава Мл 5, она может применяться для всех магниевых сплавов.

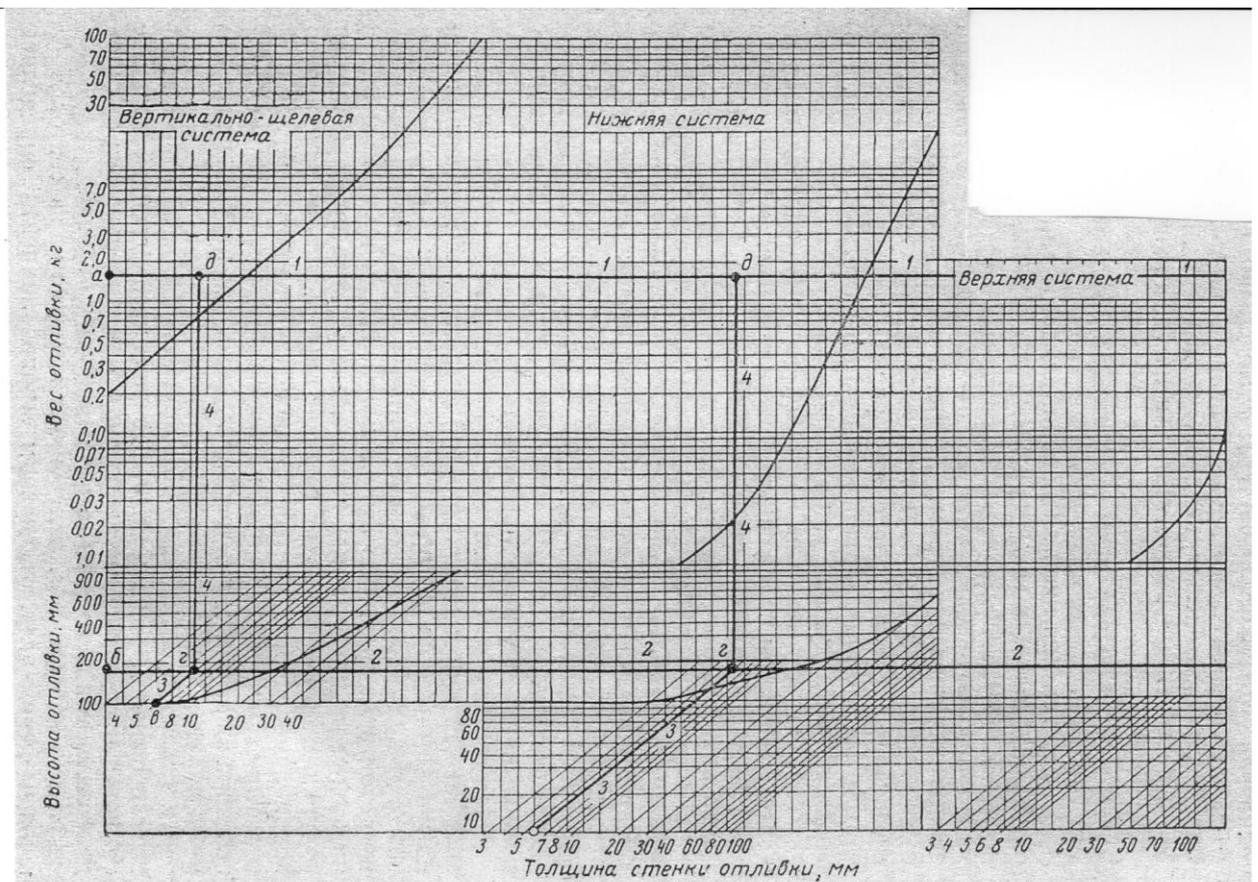


Рис. 4.5. Номограмма для выбора типа литниковой системы для отливок из сплава Мл 5.

Для выбора типа литниковой системы по номограмме необходимо предварительно определить:

1. высоту отливки без прибылей (мм); определяется по чертежу отливки и положению ее в форме;
2. среднюю толщину отливки (мм), включая припуск на механическую обработку;
3. массу отливки без прибылей (кг), определяемую по чертежу детали и умноженную на коэффициент для деталей типа:
  - колес и цилиндров – 1,8;
  - каркасов, рам, кронштейнов – 1,6;
  - деталей моторного литья (картеры, помпы, блоки и др.) – 1,5.

Коэффициенты уменьшаются, если отливки не подвергаются меха-

нической обработке.

Номограмма имеет 3 зоны, соответствующие вертикально-щелевой, нижней и верхней литниковой системе. Для определения типа литниковой системы необходимо выполнить следующее:

1. На оси ординат находят точку, соответствующую массе отливки (вес отливки на номограмме) – точка «а», и проводят горизонтальную линию 1 до конца номограммы.
2. На той же оси в нижней части находят точку «б», равную высоте отливки, и от нее проводят горизонтальную линию 2 до конца номограммы.
3. На оси абсцисс номограммы, в зоне, где линия 2 пересекает наклонные линии, находят точки «в», отвечающие средней толщине стенок отливки, проводят линии 3 до пересечения с линией 2.
4. Из точек «г», полученных от пересечений линии 2, отвечающей высоте отливки, с линиями 3, отвечающими средней толщине стенок отливки, проводят вверх линии, параллельные оси ординат, до пересечения с линией 1, отвечающей массе отливки (точки «д»).
5. Положение точек «д», полученных в каждом из секторов (в верхней части номограммы, отделенных жирными кривыми), определяет тип пригодной литниковой системы.

Если выпадает случай, что пригодны 2 типа литниковой системы (в нашем случае пригодны вертикально-щелевая и нижняя, или могут быть пригодны нижняя и верхняя литниковая системы), то выбирается нижняя литниковая система.

Анализируя номограмму, можно отметить:

1. Верхняя литниковая система может применяться для мелкого литья, имеющего небольшую высоту (не более 150 мм).
2. Вертикально-щелевая литниковая система применяется для высоких тонкостенных отливок, у которых высота превышает среднюю тол-

щину в 50 и более раз.

3. Наибольшее применение находит нижняя литниковая система.

### 4.3. Расчет элементов литниковой системы

Задача литниковой системы для легкоокисляющихся сплавов заключается в обеспечении такой скорости течения расплава ( $V_{\phi}$ ) в полости формы, которая:

1. должна быть больше минимальной скорости, при которой еще не наблюдается тепловых дефектов (недоливы, неслитины, спаи), т. е.:

$$V_{\phi} \geq V_{\phi\min};$$

2. должна быть меньше максимальной скорости, при которой характер потока соответствует допустимой степени турбулентности, т. е.:

$$V_{\phi} \leq V_{\phi\max}.$$

На  $V_{\phi\min}$  оказывают влияние теплофизические (температура заливки сплава, его удельная теплоемкость, температура и материал формы) и гидравлические (конфигурация, высота и толщина стенок отливки) факторы.

На  $V_{\phi\max}$  оказывают влияние гидродинамические условия заливки, которые рассматривались в § 4.1.

Н. М. Галдин предлагает производить расчет площадей различных элементов литниковой системы исходя из скорости течения металла в полости формы. Величина этой скорости для заданного сплава и температуры заливки должна обеспечить как заполняемость формы, так и условия спокойного течения металла в ней. При этом расчетная скорость (см/с) потока в форме  $V_{\phi}$  не должна превышать максимального значения, определенного из допустимого значения числа Рейнольдса:

$$V_{\phi\max} = V_{\phi} = \frac{R_{\text{эф}} \cdot V}{4R_{\phi}} \quad (4.4),$$

где  $R_{\text{эф}}$  – максимально допустимое число Рейнольдса для полости формы;  $V$  – кинематическая вязкость расплава;  $R_{\phi}$  – гидравлический ра-

диус полости формы, равный отношению площади поперечного сечения потока ( $F_\phi$ ) к смоченному периметру ( $R_\phi$ ).

Значения чисел Рейнольдса для полости формы, определенные опытным путем, меняются в широких пределах в зависимости от сложности отливки, поэтому допустимая скорость и допустимый расход металла через полость формы тоже меняются в широких пределах:

$$V_{\phi\max} = \frac{1,2 \div 3,9}{R_\phi} \quad (4.5),$$

$$Q_\phi = V_{\phi\max} \cdot F_\phi = \frac{1,2 \div 3,9 F_\phi}{R_\phi} = KR_\phi \quad (4.6).$$

Полученная таким образом величина максимально допустимого расхода ( $Q_\phi$ ) по условию неразрывности потока должна быть равна расходу расплава через стояк ( $Q_c$ ), который определяется по формуле:

$$Q_c = Q_\phi = F_c \cdot V_c \quad (4.7),$$

где  $F_c$  – площадь поперечного сечения стояка в нижнем основании;  $V_c$  – скорость потока в стояке в начальный момент заливки, определяемая по известной зависимости:

$$V_c = \mu \sqrt{2gH} \quad (4.8),$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода;  $H$  – металлостатический напор, равный сумме высоты стояка и высоты металла в чаше.

Площади поперечных сечений коллектора ( $F_k$ ) и питателей ( $F_\pi$ ) определяют из принятого соотношения:

$$F_c : F_k : F_\pi.$$

Определение размеров литниковой системы по этой методике связано с некоторыми затруднениями. В частности, допустимые значения критерия Рейнольдса меняются в зависимости от типа отливки в широких пределах и определялись применительно к алюминиевым сплавам. Кроме того, часто трудно определить значение коэффициента расхода расчетом из-за отсутствия коэффициентов сопротивлений. Эксперимен-

тальные значения коэффициентов расхода – ограничены.

В связи с этим расчет размеров элементов литниковой системы для литья магниевых сплавов основывается в большей степени на производственном опыте.

Основными расчетными элементами литниковых систем являются размеры стояков, коллекторов, горизонтальных питателей, вертикальных колодцев и вертикальных щелей.

Расчет проводится в следующей последовательности:

**1.** Определяется суммарная площадь сечения стояков по номограмме (рис. 4.6), для пользования которой необходимы данные:

- высота отливки без верхних прибылей (шкала I);
- толщина стенки отливки (шкала II) с припуском на механическую обработку;
- масса отливки (так же, как при определении типа литниковой системы, шкала III).

На шкале I, II, III находят точки «а», «б», «в». Через точки «а» на шкале I и «в» на шкале III проводят прямую линию до пересечения со шкалой IV (вспомогательная шкала) и получают точку «г». Соединяют прямой линией точки «б» на шкале II и точки «г» на шкале IV и продолжают линию до пересечения со шкалой V. Точка «д» на этой шкале соответствует суммарной площади сечения стояков.

Анализ этой номограммы показывает, что суммарная площадь сечения стояков прямо пропорциональна массе отливки и обратно пропорциональна высоте и толщине стенки отливки, т. е.:

$$\Sigma t_{ст} = K \frac{Q}{bH} \quad (4.9),$$

где Q – масса отливки, кг; H – высота отливки, мм; b – толщина отливки, мм; K – коэффициент.

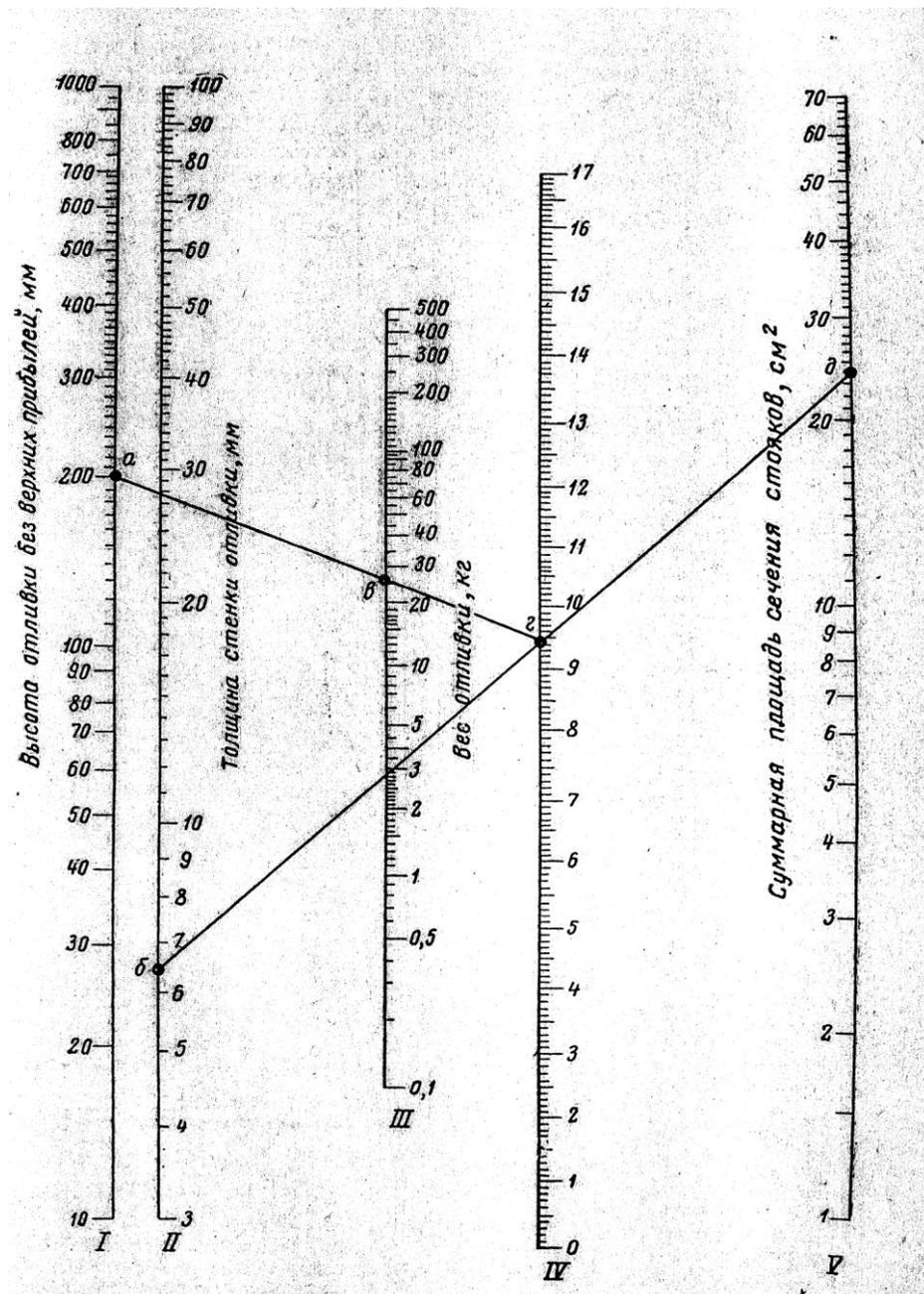


Рис. 4.6. Номограмма для определения суммарной площади сечения стояков при литье сплава Мл 5 в песчаные формы.

2. Выбор конфигурации стояков и определение их количества. Проводится в зависимости от максимального металлостатического напора, который равен высоте от нижней части коллектора до уровня сплава в литниковой чаше. Он может определяться, как сумма высоты отливки в форме, высоты верхних прибылей, приблизительно равных высоте от-

ливки, умноженной на коэффициент: 1 – для отливок высотой до 150 мм, 0,5 – для отливок высотой от 150 до 300 мм и 0,3 – для отливок высотой от 300 до 700 мм; высоты металла в чаше, равной 150-200 мм.

Для расширяющихся литниковых систем, для которых площадь сечения элементов последовательно увеличивается по направлению от стояка к коллектору и питателям при соотношении площадей 1:2:4, большая часть гидравлических сопротивлений (около 90%) сосредоточена в стояке. В связи с этим при увеличении гидростатического напора для снижения скорости металла в стояке требуется усложнение его конструкции.

Применяют 3 типа стояков: круглые, прямоугольные и змееобразные; последние выполняются в стержнях (рис. 4.1 и 4.2).

Для мелкого литья при напорах до 350 мм применяются круглые стояки, для среднего и крупного литья при напорах от 350 до 500 мм – пластинчатые, и для крупного литья при максимальном гидростатическом напоре применяются змееобразные стояки с различным количеством витков. Чем больше гидростатический напор, тем с большим количеством витков применяются стояки (от 3 для напора 500 мм до 6,5 для напора 120 мм).

Линейные размеры одного круглого, плоского и змееобразного стояка приводятся в справочной литературе в виде таблиц. Делением суммарной площади сечения стояков на площадь одного стояка определяют их количество (количество стояков, объединенных одной литниковой чашей, не должно превышать 8).

**3.** Площадь поперечного сечения коллектора при течении сплава в одну сторону берется кратной 2 суммарным площадям поперечного сечения стояков, при течении в 2 стороны от стояка площадь поперечного сечения коллектора берется равной поперечному сечению стояков. Число ветвей коллектора определяется на основании принятого метода

заливки и возможного подвода питателей. Течение расплава в 2 стороны от стояка предпочтительнее, так как при этом обеспечивается более короткий путь до полости формы. Поперечное сечение коллектора представляет собой трапецию, у которой верхнее основание принимается равным 0,8 нижнего основания. Линейные размеры коллектора (размеры оснований и высоты трапеции) выбираются по таблицам в зависимости от площади поперечного сечения его. При изменении площади поперечного сечения от 2 до 20 см<sup>2</sup> размеры меняются:

- нижнее основание трапеции – от 14 до 43 мм;
- высота трапеции – от 17 до 52 мм.

На концах коллектора устанавливаются шлаковыпоры.

**4.** Суммарная площадь поперечного сечения питателей выбирается равной 4 площадям суммарного поперечного сечения стояков. Питатели следует располагать равномерно по периметру отливки, стремясь к тому, чтобы площади поперечных сечений питателей, присоединенных к разным ветвям коллектора, были одинаковы.

Расстояние от коллектора до отливки (длина питателя должна составлять 25-60 мм, толщина питателя – 4-8 мм, ширина – 25-60 мм).

Определение размеров вертикально-щелевой литниковой системы заключается в определении размеров вертикальных колодцев и вертикальных щелей и их количества. Для этого необходимо по чертежу отливки определить:

1. Смоченный периметр. Тогда суммарная ширина вертикальных щелей определяется по формуле:

$$\Sigma\sigma_{щ} = 0,012P,$$

где P – периметр сечения отливки.

2. Ширина одной щели составляет:

$$\sigma_{щ} = (1,4-1,5)\sigma_0,$$

где  $\sigma_0$  – толщина отливки.

3. Количество щелей соответствует количеству колодцев и находится из выражения:

$$n = \frac{\Sigma \sigma_{щ}}{\sigma_{щ}}.$$

4. Длина щели (расстояние от колодца до отливки):

$$l_{щ} = d_k > 4\sigma_{щ},$$

где  $d_k$  – диаметр колодца.

5. Диаметр одного колодца:

$$d_k = (4-6)\sigma_{щ}.$$

Колодцы устанавливаются на горизонтальные питатели, суммарное поперечное сечение которых должно равняться 3 суммарным сечениям стояков. Вертикальные колодцы и вертикальные щели следует располагать равномерно по периметру отливки и доводить их до верха формы. Подводить щели следует в наиболее толстую часть отливки. Во избежание перегрева формы в местах подвода сплава через вертикальные щели устанавливают местные холодильники шириной 30-40 мм и толщиной 15-20 мм.

#### **4.4. Прибыли для отливок из магниевых сплавов**

Непрерывным условием для получения плотных отливок является направленное затвердевание их в сторону прибыли. Прибыль должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- иметь объем, достаточный для компенсации усадки затвердевания;
  - затвердевать позднее той части отливки, к которой она присоединена;
  - иметь конфигурацию, обеспечивающую минимальную поверхность охлаждения и, соответственно, минимальный расход металла.
- Чтобы выполнить эти требования, необходимо определить:
- количество прибылей и место их установки;
  - конфигурацию прибылей;

- размеры прибылей.

Прибыль присоединяют к наиболее массивным частям отливок, местным утолщениям, сопряжениям различных элементов, т. е. к тем местам, которые образуют узлы питания.

Узлы питания – это части отливок, которые затвердевают в последнюю очередь и через которые осуществляется питание отливок.

Ни один из массивных узлов отливки не должен обособляться в процессе затвердевания от источника питания, которым является прибыль. Поэтому на отливках с несколькими тепловыми узлами или на больших отливках, имеющих постоянное сечение, устанавливают несколько прибылей. При этом расстояние между прибылями не должно превышать радиуса действия прибыли. Для определения зоны действия прибылей можно воспользоваться соотношениями между приведенными радиусами прибыли ( $R_{\text{п}}$ ) и питаемого узла отливки ( $R_{\text{отл}}$ ), длиной питаемой зоны прибыли ( $l_{\text{п}}$ ) и толщиной питаемого узла отливки ( $l_{\text{отл}}$ ):

|                               |     |      |     |      |     |
|-------------------------------|-----|------|-----|------|-----|
| $R_{\text{п}}/R_{\text{отл}}$ | 1,0 | 1,25 | 1,5 | 1,75 | 2,0 |
| $l_{\text{п}}/l_{\text{отл}}$ | 4,0 | 5,5  | 6,5 | 6,75 | 7,0 |

На рис. 4.7 приведены наиболее типичные узлы питания и расположение на них прибылей.

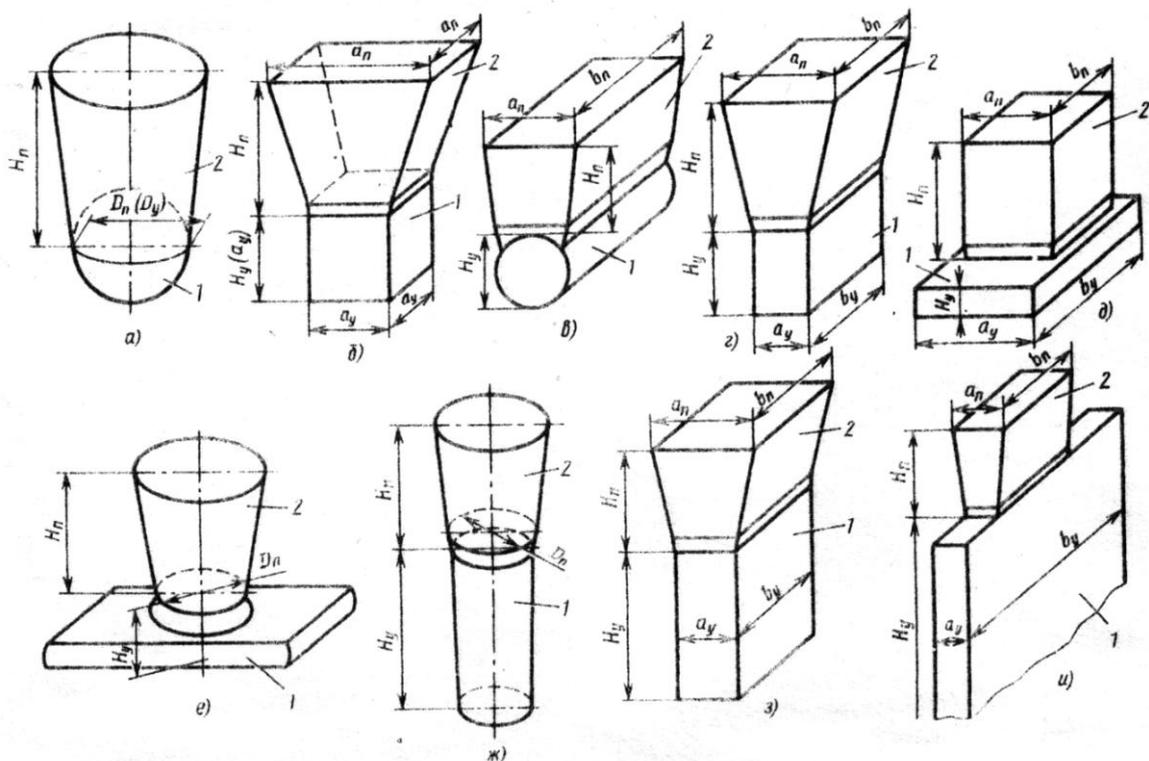


Рис. 4.7. Формы типовых узлов питания и расположение на них прибылей:

1 – узел питания; 2 – прибыль;

$D_n$ ,  $a_n$  и  $D_y$ ,  $a_y$ ,  $b_y$  – размеры соответственно прибылей и узлов питания.

По форме узлы питания подразделяются на шаровые (а), кубические (б), круглые (в, ж) и плоские (г, д, е, з, и); по расположению на отливке – на горизонтальные (в, г, д, е) и вертикальные (ж, з, и). Шар и куб относятся к средним по высоте узлам питания. Для них высота прибыли примерно равна высоте узла питания. С точки зрения наименьших тепловых потерь наиболее выгодной формой прибыли является цилиндр.

После определения числа прибылей и их конфигурации производится расчет основных размеров прибылей. В большинстве случаев для этого применяются эмпирические зависимости типа приведенных ниже.

Объем усадочной раковины  $V_p$  определяют как сумму усадок отливки (или питаемого узла) и прибыли:

$$V_p = \alpha(V_{отл} + V_{п}) \quad (4.10),$$

где  $\alpha$  – коэффициент объемной усадки сплава от температуры заливки до температуры солидуса (для магниевых сплавов – 0,05-0,075, для широко применяемого сплава Мл 5 – 0,075);  $V_{отл}$  – объем питаемого узла;  $V_{п}$  – объем прибыли.

Объем усадочной раковины составляет часть объема прибыли, т. е.:

$$V_p = KV_{пр},$$

где  $K$  – коэффициент запаса, равный 1/3-1/6 для обычных открытых прибылей и 1/7-1/9 для закрытых прибылей.

Объединяя эти выражения, получим:

$$V_{п} = \frac{\alpha}{K - \alpha} V_{отл} \quad (4.11).$$

Усадочная раковина не должна выходить за пределы прибыли. Для цветных сплавов принято считать отношение высоты прибыли к высоте отливки равным в среднем 1,5.

Чтобы прибыль затвердевала в последнюю очередь (после затвердевания отливки), приведенная толщина ее должна быть больше приведенной толщины отливки или узла питания, на который она установлена.

Пользуясь обозначениями, представленными на рис. 4.7, приняв время затвердевания прибыли на 40% больше времени затвердевания узла питания, и отношением высоты прибыли к высоте узла питания, равным 1,5, получим значения диаметра круглой или толщины плоской прибыли:

$$D_{п} = \frac{3H_y \cdot D_y}{2H_y + D_y} \quad (4.12),$$

$$b_{п} = \frac{2H_y \cdot b_y}{H_y + b_y} \quad (4.13),$$

где  $D_{п}$  – диаметр прибыли,  $D_y$  – диаметр узла питания,  $b_{п}$  – ширина прибыли,  $b_y$  – ширина узла питания,  $H_y$  – высота узла питания.

Определив объем прибыли ( $V_{п}$ ), а также ее диаметр ( $D_{п}$ ) или ширину ( $b_{п}$ ) и задавшись отношением  $H_{п}/D_{п}$ , определяют площадь поперечного сечения и высоту прибыли. Для простоты определения размеров прибылей для сплава Мл 5 М. Б. Альтманом с сотрудниками разработаны номограммы, которые могут быть использованы и для других магниевых сплавов. На рис. 4.8 показана номограмма для определения размеров плоских прибылей.

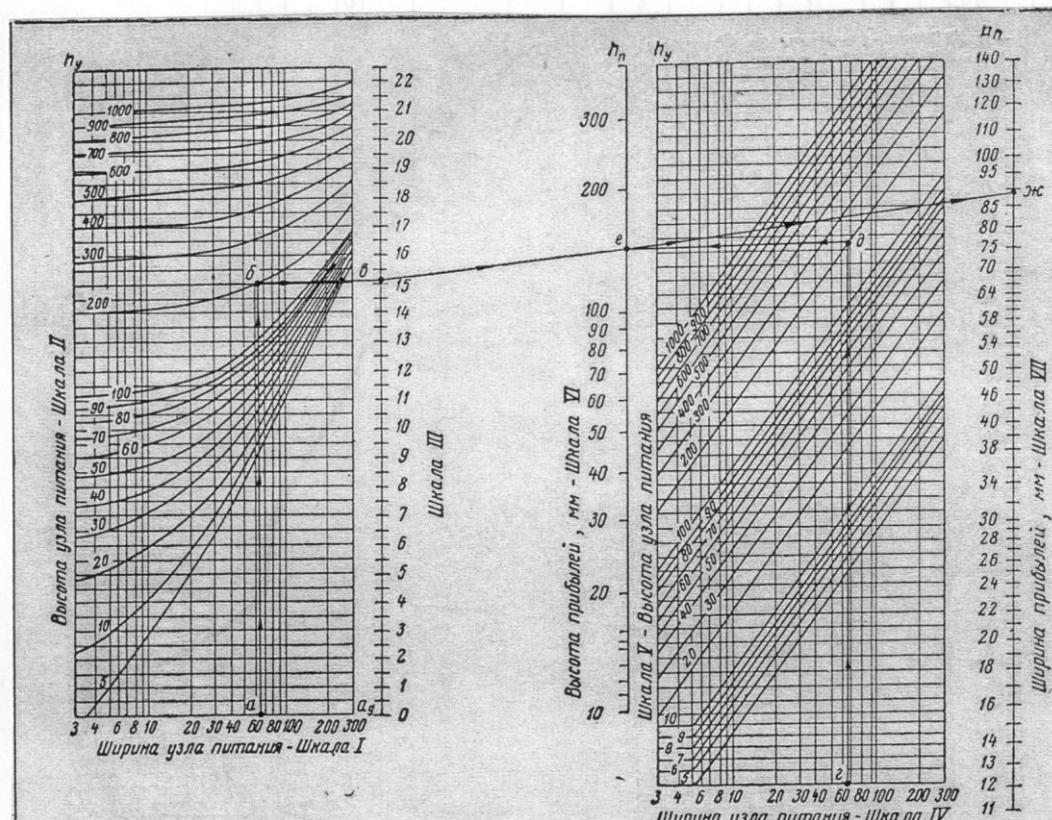


Рис. 4.8. Номограмма для определения размеров плоских прибылей.

В первую очередь на шкале I находят точку, отвечающую ширине узла питания (например, точка «а»), на котором устанавливается прибыль. Из точки «а» поднимаются по шкале II до пересечения с кривой, соответствующей высоте узла питания, на который устанавливается прибыль (точка «б»). Из точки «б» двигаются вправо параллельно шкале I до пересечения ее со шкалой III, получают точку «в».

В правой части номограммы на шкале IV снова находим точку,

соответствующую ширине узла питания, и обозначим ее как точка «г». Из этой точки «г» поднимаемся вверх параллельно оси ординат до пересечения с кривой, отвечающей значению высоты узла питания на шкале V, получаем точку «д». Из полученной точки «д» движемся вправо до пересечения со шкалой VI, получаем точку «е», которая определяет минимально возможную высоту прибыли. Через найденные на шкалах III и IV точки «в» и «е» проводим прямую вправо до пересечения со шкалой VII, на которой точка «ж» указывает значение ширины прибыли. Длина прибыли принимается равной длине узла питания. Аналогичная номограмма разработана и для определения размеров круглых прибылей.

В конечном итоге размеры прибылей должны быть такими, которые обеспечивают гарантированное питание отливки. В то же время, завышение размера прибылей, не принося пользы, может оказать вредное влияние из-за сильного местного перегрева и образования горячих трещин. Оптимальный размер прибылей может быть установлен с использованием методики компьютерного моделирования.

#### **4.5. Холодильники**

Холодильники представляют собой металлические вставки, которые помещаются в форму или стержень с целью ускорения охлаждения отдельных массивных частей отливки и обеспечения ее направленного затвердевания. По месту установки холодильники могут быть внутренние (расплавляемые) и внешние.

Для магниевых сплавов применяются только внешние холодильники, которые могут быть изготовлены из стали, чугуна, медных и даже алюминиевых сплавов. Захлаживающий эффект холодильника зависит от массы и удельной теплоемкости его. Масса холодильника не должна быть выше 10-15% от массы захлаживаемого узла. Форма холодильни-

ка определяется формой захлаживаемого узла.

На рис. 4.9 показаны схемы расположения плоских (а), круглых (б) и фасонных (в) холодильников.

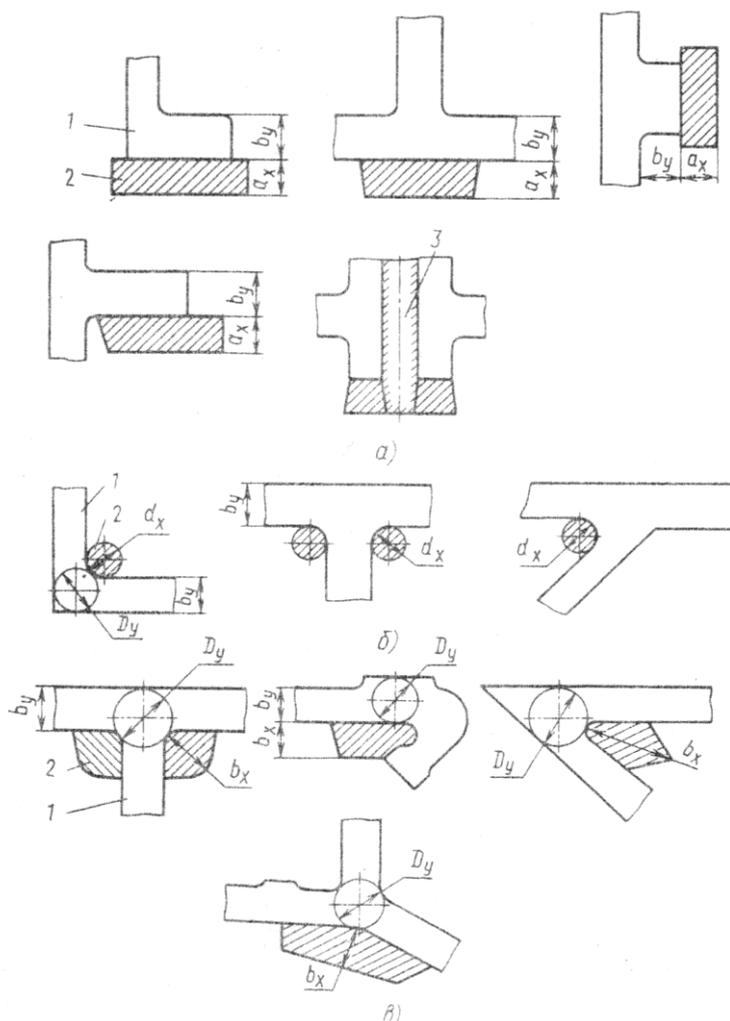


Рис. 4.9. Схемы расположения холодильников различной формы на термических узлах.

1 – отливка, 2 – холодильник, 3 – стержень.

Толщина ( $a_x$ ,  $b_x$ ) или диаметр ( $d_x$ ) находятся в зависимости от толщины ( $b_y$ ) или диаметра ( $D_y$ ) захлаживаемого узла отливки и находятся из соотношений:  $a_x = (0,6-1,25)b_y$ ,  $d_x = (0,6-1,25)D_y$ ,  $b_x = (0,6-1,25)D_y$ .

Меньшее значение коэффициентов принимают для холодильников, изготовленных из стали и медных сплавов, среднее – из чугуна и большее – из алюминиевых сплавов.

Перед установкой в форму поверхности холодильников подвергают дробеструйной очистке, наносят на них слой краски, которая применяется для кокильного литья магниевых сплавов, и подсушивают.

## **ГЛАВА V. ЛИТЬЕ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ В КОКИЛЬ И ПОД ДАВЛЕНИЕМ**

В соответствии с ГОСТ 17819-84 кокилем называется металлическая форма с естественным или принудительным охлаждением, заполняемая расплавленным металлом под действием гравитационных сил.

Сущность процесса состоит в многократном применении металлической формы, имеющей более высокую стойкость по сравнению с песчаной или полупостоянной формой.

Основные технические преимущества кокильного литья заключаются в получении отливок более высокого качества в связи с более интенсивным отводом теплоты перегрева и затвердевания отливки. Кроме того, высокая прочность материала формы обеспечивает получение рабочей полости формы с более точными и стабильными размерами. Минимальное физико-химическое взаимодействие расплава с материалом формы способствует повышению качества поверхности отливки, что ведет к уменьшению припусков на механическую обработку и повышению выхода годного металла.

Оптимальная толщина стенок деталей, отливаемых в кокиль, составляет 5-10 мм, но на отдельных ограниченных участках или на мелких деталях возможно получение стенок толщиной менее 4 мм. Масса отливок может достигать 50 кг и более.

При литье в кокиль магниевых сплавов экономия металла может составлять около 40%, а себестоимость 1 тонны литья может снизиться на 50-60%.

В то же время, изготовление кокилей обходится в несколько раз дороже, чем изготовление деревянных или металлических моделей. Поэтому экономически оправданным литье в кокиль является для крупносерийного или массового производства. Например, для мелкого литья несложной формы партия может составлять несколько сот отливок, для литья средней сложности – несколько тысяч, а для сложного – несколько десятков тысяч отливок.

### **5.1. Требования к отливкам для кокильного литья**

Большинство требований к отливкам для кокильного литья совпадают с требованиями для других способов литья. Существо этих требований сводится к следующему:

1. Наиболее простое внешнее очертание – без острых углов, резких поворотов, высоких ребер, выступов и глубоких карманов.
2. Острые и прямые углы и, особенно, переходы от толстого к тонкому сечению должны быть закруглены. Плавность перехода от одного сечения к другому обеспечивается, если переход осуществляется на участке длиной  $l = (4-5)(\sigma_1 - \sigma_2)$ , где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – толщины толстого и тонкого узлов. Радиусы округлений принимаются равными полусумме сопрягаемых толщин.
3. Контуры отливки должны быть такими, чтобы обеспечивалось беспрепятственное удаление ее. Для магниевых сплавов уклон по направлению движения для наружной поверхности должен составлять 2,5%, а для внутренней поверхности со стороны металлического стержня – (2,0-3,0)%. В случае применения песчаных стержней необходимость уклонов на них отпадает.
4. Отливки должны иметь стенки оптимальной толщины. Минимальные толщины для магниевых сплавов приводятся ниже:

| Характеристика отливки | Толщина стенки, мм     |                   |
|------------------------|------------------------|-------------------|
|                        | Металлический стержень | Песчаный стержень |
| Мелкие                 | 4                      | 3                 |
| Средние                | 6                      | 5                 |

5. Следует избегать резких переходов от толстых к тонким сечениям и стремиться к получению равностенных отливок. Рекомендуется принимать отношение толщины внутреннего ребра или стенки к толщине наружной равным 0,7.
6. Для уменьшения механической обработки конструкция кокиля должна допускать выполнение в отливке как сквозных, так и глухих отверстий

| Диаметры отверстий в отливках, мм |                 |                 | Отношение глубины отверстия к диаметру |                    | Конусность стержней, град. |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|--|--------------------|----------------------------|
| мелкие отливки                    | средние отливки | крупные отливки | глухие отверстия                       | сквозные отверстия |                            |
| 6                                 | 7               | 8               | 2-3                                    | 3-6                | 2-3                        |

7. Обеспечить такое сочетание конструктивных элементов, при котором соблюдается принцип направленного затвердевания и уменьшается торможение линейной усадки.

Иногда требуется изменить конструкцию отливки для того, чтобы она полнее отвечала перечисленным выше требованиям, т. е. чтобы была более технологичной.

Существуют различные способы количественной оценки технологичности отливок. Один из них заключается в определении коэффициента габаритности ( $\text{дм}^3/\text{кг}$ ):

$$K_V = \frac{V_{\text{габ}}}{M_{\text{отл}}} \quad (5.1),$$

где  $V_{\text{габ}}$  – габаритный объем отливки,  $M_{\text{отл}}$  – масса отливки.

Чем меньше величина  $K_V$ , тем технологичнее отливка.

Для оценки технологичности тонкостенной отливки можно вос-

пользоваться неравенством:

$$200R_{\text{пр}}/L \geq 1 \quad (5.2),$$

где  $R_{\text{пр}}$  – приведенная толщина отливки,  $L$  – наибольший размер отливки.

Эти выражения позволяют произвести сравнительный анализ технологичности различных вариантов конструкции отливки и выбрать для литья в кокиль наиболее технологичную.

## **5.2. Литниково-вентиляционные системы, применяемые для литья магниевых сплавов в кокиль**

При литье в кокиль литниковые системы играют не меньшее значение, чем при литье в песчаные формы. Они должны обеспечить плавный, безударный подвод металла в полость формы и удаление воздуха и газов из нее, предотвратить попадание шлака в отливку и создать условия для направленного затвердевания и питания отливки. Литниковая система оказывает значительное влияние на выбор положения отливки в форме и на конструкцию последней.

При конструировании кокилей стремятся свести до минимума количество и площадь поверхностей разъема, что затрудняет, а часто делает невозможным применение разветвленных комбинированных литниковых систем.

Для литья в кокиль магниевых сплавов применяются литниковые системы с верхним, нижним или вертикально-щелевым подводом металла.

Верхняя литниковая система осуществляет подвод металла через стояк и питатель непосредственно к отливке или к коллектору, расположенному по верхнему периметру отливки.

Для того, чтобы исключить размыв песчаных стержней, окисление и шлакообразование металла, верхний подвод применяется для некрупных отливок небольшой высоты. Еще лучше при верхней литниковой

системе заменить заливку свободно падающей струей на заливку струей, стекающей по наклонной плоскости. Для этого применяется заливка в наклоненные под углом  $30-50^0$  кокили с постепенным возвращением (кантовкой) его по мере заполнения в горизонтальное положение.

Преимущества и недостатки нижней и вертикально-щелевой систем – такие же, как при литье в песчаные формы. Для этих литниковых систем применяют стояки 3-х типов: цилиндрические, плоские и змееобразные. Последние получили распространение для крупных отливок. Цилиндрические стояки рекомендуется выполнять наклонными.

Питатели чаще всего применяют щелевые горизонтальные или вертикальные. Во избежание местных перегревов целесообразно обеспечить рассредоточенный подвод металла через несколько питателей.

При литье магниевых сплавов в кокиль применяются расширяющиеся литниковые системы. Соотношение суммарных площадей поперечных сечений стояка ( $\Sigma F_{ст}$ ), коллектора ( $\Sigma F_k$ ) и питателей ( $\Sigma F_{п}$ ) для мелких и средних отливок принимается равным 1:2:3, а для крупных отливок – как 1:3:6.

Учитывая невысокую температуру плавления магния и высокую температуру разогрева кокиля, можно предполагать, что во время заполнения твердая корка в каналах литниковой системы не образуется. Тогда определение площади поперечного сечения стояков можно производить по тем же методикам, которые применяются при литье магниевых сплавов в песчаные формы.

При проектировании вертикально-щелевой литниковой системы ширину щелей и диаметр колодцев принимают несколько большими, чем это делается для литья в песчаные формы, а именно:

$$\sigma_{щ} = (1,5-2,0)\sigma_{отл},$$

$$d_k = (5-6)\sigma_{щ}.$$

Металлические материалы, применяемые для изготовления кокилей,

имеют нулевую газопроницаемость, поэтому при проектировании и изготовлении кокиля необходимо предусматривать вентиляционную систему, предназначенную для вывода газов из полости формы. Сообщение полости формы с атмосферой осуществляется через открытые прибыли и выпоры, зазоры на разъемах формы, стержней и в отверстиях толкателей.

На плоскостях разъема кокиля располагают плоские канавки глубиной 0,2-0,3 мм и шириной 3-25 мм.

На участках, где образуются замкнутые объемы и отсутствуют разъемы, сверлятся отверстия диаметром 3-8 мм, в которые вставляются металлические пробки, имеющие вдоль боковой поверхности лыски глубиной 0,2-0,4 мм. Можно использовать пробки из спеченных металлических порошков или пакеты из запрессованных иголок.

В связи с тем, что на поверхности отливки в зоне установки вентиляционных каналов появляются отпечатки, то желательно, чтобы установка их происходила на плоскостях, подвергающихся механической обработке.

### **5.3. Подготовка кокилей и заливка металла**

Подготовка кокиля к заливке включает в себя нанесение на кокиль покрытий, обеспечение заданной температуры, подготовку и установку песчаных стержней.

Покрытия, наносимые на рабочие поверхности металлических стержней, фасонных полостей и подвижных частей формы позволяют:

1. Регулировать интенсивность теплообмена между отливкой и кокилем за счет теплопроводности и толщины наносимого слоя покрытия. Чем толще слой покрытия, тем медленнее протекает затвердевание. Поэтому толщина наносимого покрытия на поверхности, оформляющей прибыли, может составлять 2,0-3,0 мм, на поверхности литниковой системы – 0,5-1,0 мм, а на поверхности кокиля, образующей отливку, – 0,1-0,3 мм. Стенки кокиля, оформляющие толстые части от-

ливки, покрывают более тонким слоем.

2. Устранить приваривание сплава к стенкам формы и стержням и предотвратить химическое взаимодействие их с расплавом.
3. Обеспечить получение чистой поверхности отливки и облегчить удаление стержней.
4. Облегчить удаление воздуха через поры покрытия.

В состав покрытия входят огнеупорные наполнители, связующие, активизаторы и вода.

В качестве огнеупорных наполнителей используется мел, тальк, окись магния, окись цинка, асбест и др. Все наполнители предварительно размалывают и просеивают через сито с ячейками 0,3-1,0 мм<sup>2</sup>. Асбест прокаливают при температуре 1000-1100<sup>0</sup> С и просеивают через сито с ячейками около 3 мм<sup>2</sup>.

В качестве связующего чаще всего используется жидкое стекло, которое обволакивает зерна наполнителя и скрепляет их при твердении в плотную и прочную пленку покрытия.

Схватывание и твердение силикатного покрытия происходит в результате выделения геля кремниевой кислоты при взаимодействии углекислоты воздуха на жидкое стекло по реакции:



Протекая очень медленно при нормальной температуре, процесс сильно ускоряется с повышением температуры. Поэтому нанесение краски производится на разогретый кокиль. При окрашивании кистью температура кокиля не должна превышать 130° С, а при окрашивании пульверизатором – не выше 200° С.

Активизаторы применяются для улучшения схватывания покрытия с поверхностью металлической формы. Для большинства покрытий, применяемых для магниевых сплавов, используется борная кислота (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>).

При приготовлении покрытия наполнители замешивают в подогретую до 70-80° С, борную кислоту вводят в виде отдельно приготовленного раствора, а жидкое стекло – после охлаждения суспензии до комнатной температуры.

Составы кокильных красок, применяемых для магниевых сплавов, приведены в таблице 5.2.

**Таблица 5.2**

**Составы и область применения кокильных покрытий  
для литья магниевых сплавов**

| № п/п | Состав, % по массе |      |               |                |                   |      | Область применения                         |
|-------|--------------------|------|---------------|----------------|-------------------|------|--|
|       | Асбест прокаленный | Мел  | Жидкое стекло | Борная кислота | Прочие            | Вода |  |
| 1     | –                  | –    | 3,0           | 4,0            | окись магния – 15 | 78   | При получении отливок сложной конфигурации |
| 2     | –                  | 5,0  | 2,0           | 2,0            | тальк – 5         | 86   | При получении средних и мелких отливок     |
| 3     | 15,0               | 10,0 | 3,0           | 4,0            | –                 | 68   | Утепление выпоров и литников               |
| 4     | 6,0                | –    | 2,0           | 2,5            | окись цинка – 5   | 84,5 | Окраска выпоров и литников                 |
| 5     | 25,0               | 2,0  | 6,5           | –              | –                 | 66,5 | Окраска прибылей и литников                |

Графит для приготовления защитных покрытий не применяется, так как является материалом, обладающим высокой теплопроводностью и плохо предохраняет металлическую форму от термического воздействия заливаемого металла.

В то же время, при необходимости повышения чистоты поверхности отливки для окраски рабочей поверхности кокиля применяются краски, в которых в качестве огнеупорного наполнителя используется графит или тонкомолотые огнеупорные порошки с размером частиц не

более 10 мкм. Асбест в этих красках отсутствует.

**Таблица 5.3**

Составы кокильных красок, повышающих чистоту поверхности отливок

| № п/п | Состав, % по массе         |                |               |      | Область применения              |
|-------|----------------------------|----------------|---------------|------|---------------------------------|
|       | Наполнитель                | Борная кислота | Жидкое стекло | Вода |                                 |
| 1     | графит коллоидальный – 1,8 | 5,5            | 2,7           | ост. | Для литья тонкостенных отливок  |
| 2     | тальк белый – 8,5          | 2,5            | 2,5           | ост. | Для литья толстостенных отливок |
| 3     | мел тонкомолотый – 8,5     | 2,5            | 2,5           | ост. |                                 |

Литье в кокиль магниевых сплавов связано с определенными трудностями, обусловленными низкими литейными свойствами из-за широкого температурного интервала затвердевания (повышенная склонность к образованию горячих трещин, образованию макро- и микропористости, невысокой жидкотекучестью). В связи с этим необходимо тщательно соблюдать технологические условия литья.

Для предупреждения образования горячих трещин необходимо создавать такие условия затвердевания, которые уменьшают перепады температур между различными частями отливки и уменьшают величину заторможенной линейной усадки. В связи с этим применяется достаточно высокая температура нагрева кокиля, составляющая 250-300° С, а температура нагрева металлических стержней может достигать до 350-400° С.

Кокиль необходимо разогревать перед работой до рабочей или близкой к ней температуры. В дальнейшем требуемая температура поддерживается за счет температуры заливаемого металла и частотой заливки кокиля. Предварительный нагрев кокилей перед началом работы производится газовыми горелками. Для крупных кокилей может применяться электроподогрев с помощью переносного или встроенного в ко-

киль устройства.

При заливке крупных и сложных отливок для обогрева кокиля могут применяться встроенные электрические нагреватели, а для захлаживания металлических стержней и отдельных частей кокиля применяют обдув их сжатым воздухом или местное водяное охлаждение через специальные каналы.

Рациональным способом борьбы с трещинами является установка песчаных и оболочковых стержней или ранний «подрыв» при установке металлических стержней. В последнем случае производится плавное удаление стержня из отливки до момента окончательного затвердевания металла в прибылях. С этой же целью производится раннее раскрытие кокиля и удаление отливки из него.

Широкие температурные интервалы затвердевания магниевых сплавов в сочетании с низкой плотностью и, соответственно, с низким гидростатическим давлением predisполагают к развитию в отливках макро- и микропористости. Для уменьшения их применяют установку большого количества прибылей, выполнение прибылей в песчаных стержнях, установку холодильников в песчаных стержнях, выполняющих внутренние полости в отливке, нанесение на поверхность кокиля красок различного состава и толщины покрытия.

Заливка в кокиль мелких деталей производится из стационарного тигля путем вычерпывания металла, а крупные детали заливают из выемных тиглей.

Для предотвращения загорания жидкого металла горизонтальные поверхности кокиля вокруг стояков, выпоров и прибылей припыливаются серным цветом. Образующийся в процессе разлива сернистый газ проникает во внутренние полости формы и вместе с борной кислотой, находящейся в составе краски, предохраняет заливаемый металл от окисления.

Заливочный инструмент, применяемый при разливке, промывается в расплавленном флюсе, который находится во флюсовом тигле, находящемся на участке.

Температура заливки подбирается опытным путем при отработке технологического процесса и меняется в большинстве случаев от 720 до 780<sup>0</sup> С. После заливки зеркало металла в литниковой воронке и открытой прибыли припыливается серным цветом (серой).

#### **5.4. Особенности литья магниевых сплавов под давлением**

Отливки, полученные литьем под давлением, находят широкое применение в автомобильной промышленности, так как их использование способствует существенному снижению массы автомобилей и повышению мощности.

Литье под давлением магниевых сплавов может осуществляться как на машинах с холодной камерой прессования, используемых для литья алюминиевых и цинковых сплавов, так и на специализированных, обеспечивающих более высокую скорость прессования.

Повышение быстроходности машин достигается обеспечением соответствующей производительности насосов и повышенной емкостью аккумуляторов.

Современные машины с горячей камерой прессования и бесфлюсовая плавка с использованием 0,1% шестифтористой серы в сухом воздухе создают возможности для расширения производства.

Плавка магниевых сплавов осуществляется в стационарных печах с открытым тиглем, в поворотных тигельных печах, в тигельных индукционных печах промышленной частоты. Во всех типах печей используются литые или сварные стальные тигли.

Транспортировка жидкого металла может быть как ручной, так и механизированной с помощью различных заливочно-дозировочных устройств.

Автоматизированную заливку на машинах с холодной камерой прессования целесообразно применять при изготовлении крупных отливок или при работе с высоким темпом.

Специфические особенности литья магниевых сплавов по сравнению с алюминиевыми связаны с меньшим теплосодержанием и, сравнительно с силуминами, низкими технологическими свойствами.

Более быстрая кристаллизация магниевых сплавов и опасность незаполнения полости пресс-формы или образования неслитин в отливках, полученных на машинах с холодной камерой прессования, используемых для алюминиевых сплавов, вызывает необходимость:

- тщательно соблюдать температуру заливаемого металла и температурный режим пресс-формы. Температура заливаемого металла меняется от 620 до 700<sup>0</sup> С, а температура пресс-формы – от 150 до 300<sup>0</sup> С для отливок с толщинами стенок от (6-8) до (1-2,5) мм. В некоторых случаях приходится полностью исключить водяное охлаждение пресс-форм и даже обеспечивать обогрев отдельных частей с помощью встроенных в пресс-форму тенов.
- заполнение полости формы должно производиться с высокими скоростями впуска. Скорости впуска меняются в пределах от (20-30) м/с для толстостенных (6-8) мм до (70-90) м/с для тонкостенных (1-2,5) мм отливок. В связи с этим необходимо применять машины, обеспечивающие высокую (от 3 до 8 м/с) скорость прессования.
- давления прессования на жидкий металл должны быть не ниже 40-70 мПа, что достигается, в числе прочего, за счет выбора соответствующего диаметра камеры прессования, который, в зависимости от массы заливаемого металла и усилия запираения, меняется от 70 до 150 мм.

Меньшая продолжительность затвердевания магниевых сплавов по сравнению с алюминиевыми приводит к тому, что цикл изготовления отливок из магниевых сплавов составляет 2/3 от времени для алюми-

ниевых сплавов, а производительность труда может увеличиться на 50%.

Применение для мелких отливок горячекамерных машин обеспечивает получение следующих преимуществ:

- автоматизация процессов заливки и прессования;
- стабильность и простота регулирования температуры металла;
- меньшие по сравнению с холоднокамерными машинами давления прессования;
- масляное охлаждение пресс-форм способствует их более высокой стойкости. В то же время, применение водяного охлаждения позволяет значительно увеличить производительность машин.

Трудности получения отливок из магниевых сплавов литьем под давлением связаны с технологическими свойствами их. Наиболее удачно сочетающим механические, технологические свойства и коррозионную стойкость является сплав Мл 5, который в англоязычной классификации обозначается как AZ 91B. В то же время, в зарубежной литературе встречаются исследования, направленные на разработку более технологичных сплавов, предназначенных для литья под давлением. Было установлено, что для литья под давлением могут использоваться сплавы с большими, чем у сплава Мл 5, содержаниями цинка. Известно, что при литье в песчаные формы и кокиль сплавы с высоким содержанием цинка обладают хрупкостью и склонны к образованию горячих трещин. Высокая скорость охлаждения при литье под давлением способствует образованию пересыщенных твердых растворов и минимальному выделению хрупких интерметаллидов, кристаллизующихся в мелкодисперсной форме. В результате проведенных исследований был рекомендован для литья под давлением сплав, содержащий по (8,0-8,5)% алюминия и цинка и 0,2% марганца, который обозначен как AZ 88 и легко может быть получен путем дополнительного легирования сплавов МА 8Ц или МА 10Ц (ГОСТ 2581-78). Этот сплав имеет более низкие температуры лик-

видуса и солидуса и более высокую жидкотекучесть даже при снижении по сравнению со сплавом Мл 5 температуры заливки на 40<sup>0</sup> С.

Высокая жидкотекучесть сплава позволяет снизить скорость впуска. Брак по холодным и горячим трещинам и неслитинам снижается на 30-50% по сравнению со сплавом типа Мл 5.

Прочностные свойства сплава AZ 88 выше, а пластические – ниже, чем у сплава AZ 91В (Мл 5). Для повышения пластичности сплава AZ 88 рекомендуется снизить одновременно содержание цинка и алюминия при сохранении их соотношения около единицы. Таким образом получен сплав AZ 55 (5% алюминия, 5% цинка, 0,3% марганца, магний – остальное), в котором хорошо сочетаются прочностные и пластические свойства. Этот сплав упрочняется при искусственном старении. Коррозионная стойкость его сравнима со стойкостью сплава Мл 5. Однако для промышленного применения рекомендован сплав AZ 88, так как он менее чувствителен к наличию примесей, в частности, к меди, из-за более высокого содержания цинка. Свойства сплавов, полученные на образцах, отлитых под давлением, приведены в таблице 5.4.

**Таблица 5.4**

Свойства магниевых сплавов,  
полученных на образцах, отлитых под давлением

| № п/п | Сплав         | Состояние         | Механические свойства |                  |              | Интервал кристаллизации, °С |
|-------|---------------|-------------------|-----------------------|------------------|--------------|-----------------------------|
|       |               |                   | $\sigma_{0,2}$ , МПа  | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % |                             |
| 1     | AZ 91В (Мл 5) | литой             | 165,6                 | 275,4            | 8,0          | 421-596                     |
| 2     | AZ 88         | литой             | 199,9                 | 254,8            | 2,0          | 421-596                     |
| 3     | AZ 55         | литой             | 165,6                 | 275,4            | 9,0          | 346-610                     |
|       |               | литой + старение* | 206,8                 | 289,1            | 7,0          |                             |

\* – старение при 163<sup>0</sup> С в течение 24 часов.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ. Меры противопожарной безопасности при работе с магниевыми сплавами**

Магний и его сплавы являются огнеопасными, а в некоторых случаях – и взрывоопасными материалами. Поэтому, помимо общих правил техники безопасности, характерных для литейных цехов, на производствах, связанных с производством изделий из магниевых сплавов, должны соблюдаться специальные правила противопожарной и противовзрывной безопасности.

Степень пожарной опасности и взрывов увеличивается с повышением температуры и с возрастанием контактной поверхности частиц магния и его сплавов с окружающей средой. Если компактные изделия из магниевых сплавов загораются при  $580^{\circ}\text{C}$ , горение стружки начинается при  $400\text{-}500^{\circ}\text{C}$ , то горение влажной пыли начинается при  $360\text{-}380^{\circ}\text{C}$  и протекает во взрывом вследствие большей скорости горения.

Минимальная взрывоопасная концентрация магниевой пыли в воздухе равняется  $10\text{ г/м}^3$ . При концентрации пыли выше допустимой происходит воспламенение ее при образовании в помещении источника огня (пламени, искры, внесении предметов, нагретых до высокой температуры). Расплавленный магний воспламеняется со взрывом при контакте его с водой. В последнем случае в результате разложения воды образуется гремучий газ, который и сгорает с образованием взрыва.

По степени пожарной опасности производства, связанные с магнием, разделяются на группы, показанные в таблице П.1.

**Таблица П.1**

**Характеристика производств изделий из магниевых сплавов  
по степени пожарной опасности и применяемые огнегасительные средства**

| № п/п | Степень опасности и наименование производств  | Огнегасительные средства  |
|-------|---|---|
| 1     | <p>Взрывоопасное – связано с выделением пыли:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- наждачное;</li> <li>- шлифовальное;</li> <li>- полировальное</li> </ul>  | <p>Недопущение концентрации пыли выше минимально взрывоопасной концентрации за счет установки приточно-вытяжной и местной вентиляции и систематической ее чистки</p>  |
| 2     | <p>Пожароопасное, связанное с расплавленным металлом:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- плавильное отделение;</li> <li>- заливочное отделение;</li> <li>- заварка дефектов</li> </ul>  | <p>Сухой молотый флюс, применяемый для плавки магниевых сплавов; хранятся в плотно закрывающейся таре</p>   |
| 3     | <p>Относительно пожароопасные, связанные с нагревом изделий до температур ниже температур плавления:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- термическая обработка;</li> <li>- обрезка и обрубка литья;</li> <li>- механическая обработка, исключая шлифование, полирование;</li> <li>- хранение стружки и опилок</li> </ul>   | <p>Сухой молотый флюс, хранится в плотно закрывающейся таре; для тушения небольших очагов горения могут применяться:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- сухой песок;</li> <li>- окись магния или магнезит;</li> <li>- графит;</li> <li>- присадка ВМ</li> </ul> |
| 4     | <p>Пожаробезопасные производства при нормальных условиях работы. Загорание возможно только при возникновении пожара от посторонних причин:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- складские помещения шихтовых материалов (магния и сплавов);</li> <li>- склады готовой продукции</li> </ul>  | <p>Соблюдение общих правил противопожарной безопасности; хранение лигатур с РЗМ в запарафиненном состоянии; хранение стружки в закрытой таре</p>  |
| 5     | <p>Пожаробезопасные производства, не связанные с обработкой и хранением магния и его сплавов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- смесеприготовительное отделение;</li> <li>- стержневое отделение;</li> <li>- формовочное отделение, отделенное от плавки и заливки;</li> <li>- вспомогательные помещения (компрессорное, трансформаторное, бытовые и т. д.)</li> </ul> | <p>В соответствии с общими для литейного цеха нормами противопожарной безопасности</p>  |

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтман М. Б., Лебедев А. А., Чухров М. В. Плавка и литье сплавов цветных металлов. – М.: ГНТИ литературы по черной и цветной металлургии, 1963. – 524 с.
2. Альтман М. Б., Белов А. Ф., Добаткин В. И. и др. Магниевые сплавы. Справочник. Часть I. Металловедение магния и его сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 232 с.
3. Альтман М. Б., Белов А. Ф., Добаткин В. И. и др. Магниевые сплавы. Справочник. Часть II. Технология производства и свойства отливок и деформируемых полуфабрикатов. – М.: Металлургия, 1978. – 295 с.
4. Бураков С. Л. и др. Литье в кокиль. Под ред. Вейника А. И. – М.: Машиностроение, 1980. – 415 с.
5. Галдин Н. М. Литниковые системы для отливок из легких сплавов. – М.: Машиностроение, 1978. – 198 с.
6. Галдин Н. М., Чернега Д. Ф., Иванчук Д. Ф. и др. Цветное литье. Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 528 с.
7. ГОСТ 2856-79 «Сплавы магниевые литейные».
8. Гуляев Б. Б. Синтез сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – 160 с.
9. Дриц М. Е. Магниевые сплавы для работы при повышенных температурах. – М.: Наука, 1964. – 232 с.
10. Колобнев И. Ф., Крымов В. В., Полянский А. П. Справочник литейщика. Фасонное литье из алюминиевых и магниевых сплавов. – М.: ГНТИ машиностроительной литературы, 1957. – 356 с.
11. Крымов В. В., Щербаков И. С., Заварзин И. А., Ганьшина З. К. Высокопрочный литейный магниевый сплав Мл 22 (ВМл 13). // Сб. Вопросы авиационной науки и техники, серия Авиационные материалы. Металловедение и литье легких сплавов. – М.: ВИАМ, 1986.
12. Курдюмов А. В., Пикунов М. В., Чурсин В. М. Литейное производство цветных и редких металлов. – М.: Металлургия, 1982. – 352 с.

13. Напалков В. И., Бондарев Б. И., Тарарышкин В. И., Чухров М. В. Лигатуры для производства алюминиевых и магниевых сплавов. – М.: Metallurgy, 1983. – 159 с.
14. Портной К. И., Лебедев А. А. Магниевые сплавы (свойства и технология). Справочник. – М.: ГНТИ литературы по черной и цветной металлургии, 1952. – 736 с.
15. Рохлин Л. Л. Магниевые сплавы, содержащие редкоземельные металлы. – М.: Наука, 1980. – 190 с.
16. Туркин В. И., Борисов В. Г., Соколов Е. Г. Некоторые вопросы техники безопасности при работе с новыми магниевыми сплавами. // Сб. Магниевые сплавы. – М.: Наука, 1978. – с. 208-212.
17. Чистяков В. В., Малов А. Г., Честных В. А., Шатульский А. А. Теория заполнения форм расплавом. – М.: Машиностроение, 1995. – 190 с.
18. Чухров М. В. Модифицирование магниевых сплавов. – М.: Metallurgy, 1972. – 176 с.