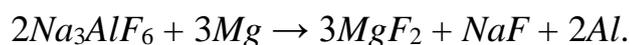


Лабораторная работа 4. Получения алюминиевых сплавов.

По мере увеличения выпуска отливок из алюминиевых сплавов промышленность все в большей мере использует вторичные сплавы, полученные переплавкой различных отходов. Как правило, у этих сплавов более высокое содержание примесей железа, магния, цинка и других металлов. Поэтому в процессе выплавки их подвергают очистке.

Очистку вторичных алюминиевых сплавов от примесей магния, цинка и железа осуществляют флюсованием, вакуумной дистилляцией и отстаиванием с последующим фильтрованием.

Удаление магния флюсом основано на реакции:



Сущность технологии очистки состоит в загрузке на поверхность перегретого до 780-800°C алюминиевого расплава смеси криолита (50%) и хлористого натрия (50 %), расплавления флюса, интенсивном перемешивании расплава с флюсом в течение 10-15 мин и удалении продуктов реакции, всплывших на поверхность расплава. При высоком исходном содержании магния (1,5-3%) в сплаве процесс рафинирования повторяют несколько раз. С помощью криолита содержание магния в алюминиевых сплавах может быть снижено до 0,1%. Для этого необходимо на каждый 1 кг удаляемого магния расходовать не менее 12 кг криолита.

Магний можно удалить из алюминиевых расплавов также флюсом, состоящим из 50% Na_2SiF_6 , 25% $NaCl$ и 25% KCl .

Очистку расплавов от магния и цинка производят дистилляцией в вакуум-дистилляционных печах при 950-1000°C. Указанная обработка позволяет получать сплавы, содержащие 0,1-0,2% Mg и 0,02-0,05% Zn . Очистку расплавов от магния этим способом производят в тех случаях, когда содержание его в сплаве велико и применение очистки флюсованием становится невыгодным.

Отстаивание, как самостоятельный процесс, используют для очистки алюминиевых расплавов от железа. Отстаиванием можно снизить содержание железа в алюминиевом сплаве до 1,7%, т. е. почти до эвтектического содержания согласно равновесной диаграмме состояния $Al-Fe$. Дальнейшее снижение достигается совмещением процесса отстаивания с введением в сплав марганца или магния. Присадка этих элементов сдвигает эвтектическую точку в сторону алюминия и способствует отделению избытка железа.

При введении в расплав 1,0-1,5% Mg содержание железа в нем может быть снижено до 0,7%. Присадка магния в количестве 25-30% позволяет довести содержание железа до 0,1-0,2%. Для ускорения процесса очистки после непродолжительного отстаивания расплавы фильтруют. Фильтрование осуществляют через нагретый до 700°C базальтовый фильтр с применением вакуума.

Рафинирование от железа при помощи магния применимо для сплавов, содержащих не более 1% Si . При более высоком содержании кремния

образуются силициды, сильно затрудняющие фильтрацию и выводящие из цикла значительное количество магния. Кроме того, сплав обедняется кремнием.

Модифицирование сплавов. К числу физико-химических процессов, происходящих при плавке алюминиевых сплавов, относятся также процессы модифицирования. Алюминиево-кремниевые сплавы подвергаются модифицированию для измельчения структуры и повышения механических свойств. Модифицирование изменяет процесс эвтектической и первичной кристаллизации.

Модификаторы можно разделить на две основные группы.

В первую группу входят модификаторы, которые в расплаве образуют высокодисперсную, коллоидно-дисперсную взвесь; отдельные частицы этой взвеси являются зародышами, вокруг которых образуются и растут кристаллы. Модификаторы этой группы увеличивают число центров кристаллизации. Они не должны химически взаимодействовать с расплавом, должны быть тугоплавкими, чтобы обеспечить твердую фазу в модифицируемом расплаве, и быть изоморфными с кристаллами расплава.

Вторую группу составляют модификаторы, действие которых на расплав сводится к тому, что поверхностно-активные молекулы этих модификаторов адсорбируются на границах зародившегося кристалла и понижают скорость его роста. Вследствие того, что процесс адсорбции протекает неравномерно, на одних гранях адсорбируется большее количество молекул, чем на других, а на некоторых гранях, возможно, адсорбция вообще не происходит, некоторые грани растущих кристаллов оказываются отделенными от расплава адсорбированным слоем постороннего вещества. Результатом этого является замедление в росте определенных граней кристалла и изменение его формы. Уменьшение скорости роста приводит к увеличению промежутка времени от начала появления зародышей до окончательного затвердевания расплава; увеличивается число центров кристаллизации, в результате чего получается более мелкозернистая структура.

Поверхностно-активными являются обычно вещества с низкой температурой плавления, сравнительно мягкие, обладающие малым значением поверхностной энергии в расплавленном состоянии на границе с воздухом. К таким веществам относятся щелочные и щелочноземельные металлы. Действие их проявляется обычно при концентрациях от 0,001 до 0,1%.

Алюминиевые сплавы модифицируют с целью измельчения макрозерна, первично кристаллизующихся фаз и фаз, входящих в эвтектики, а также с целью изменения формы выделения хрупких фаз.

Для измельчения макрозерна в расплавы вводят титан, цирконий, бор или ванадий в количестве 0,05-0,15% от массы расплава. При взаимодействии с алюминием элементы-модификаторы образуют тугоплавкие интерметаллиды ($TiAl_3$, $ZrAl_3$, TiB_2 и др.), обладающие однотипностью кристаллических решеток и размерным соответствием их параметров в некоторых кристаллографических плоскостях с кристаллическими решетками α_{Al} -твердых растворов сплавов. В расплавах появляется большое число центров кристаллизации, что обуславливает измельчение зерна в отливках. Этот вид модифицирования

широко используют при литье деформируемых сплавов (В95, Д16, АК6 и др.); при литье фасонных отливок он не нашел широкого применения. Модификаторы вводят в виде лигатур с алюминием при 720-750°C.

Еще большее измельчение макрозерна деформируемых сплавов получают при совместном введении титана и бора в виде тройной лигатуры $Al-Ti-B$ с соотношением $Ti:B = 5:1$. Центрами кристаллизации в этом случае служат частицы соединения TiB_2 размером 2-6 мкм. Совместное модифицирование алюминиевых сплавов титаном и бором позволяет получать однородную макроструктуру с размером зерна 0,2-0,3 мм в слитках диаметром более 500 мм. Для введения титана и бора используют лигатуру $Al-Ti-B$, препарат «зернолит» или флюс, содержащий фторборат и фтортитанат калия. Состав указанных модификаторов и режимы модифицирования приведены в табл. 2. Наибольшая степень усвоения титана и бора наблюдается при использовании флюса, который наряду с модифицирующим оказывает и рафинирующее воздействие.

Таблица 2

Состав модификаторов и режимы модифицирования алюминиевых сплавов

№ мод-ра	Состав модификатора	Кол-во мод-ра, %	Расчетное количество модифицирующего элемента, %	Температура модифицирования, °С
1	Лигатура <i>Al-Ti</i> (2,5% <i>Ti</i>)	1-3	0,05-0,15 <i>Ti</i>	720-750
2	Лигатура <i>Al-Ti-B</i> (5% <i>Ti</i> , 1% <i>B</i>)	1-2	0,05-0,1 <i>Ti</i> , 0,01- 0,02 <i>B</i>	720-750
3	«Зернолит» (55% K_2TiF_6 + 3% K_2SiF_6 + 27% KBF_4 + 15% C_2Cl_6)	0,2-0,5	0,01-0,02 <i>B</i> , 0,05- 0,1 <i>Ti</i>	720-750
4	Флюс (35% <i>NaCl</i> , 35% <i>KCl</i> , 20% K_2TiF_6 , 10% KBF_4)	0,5-1	0,01-0,02 <i>B</i> , 0,05- 0,1 <i>Ti</i>	720-750
5	Металлический натрий	0,05-0,1	0,05-0,1	750-780
6	Флюс (67% <i>NaF</i> + 33% <i>NaCl</i>)	1-2	0,05-0,1 <i>Na</i>	780-810
7	Флюс (62,5% <i>NaCl</i> + 25% <i>NaF</i> + 12,5% <i>KCl</i>)	1-2	0,05-0,1 <i>Na</i>	730-750
8	Флюс (50% <i>NaCl</i> , 30% <i>NaF</i> , 10% <i>KCl</i> , 10% Na_3AlF_6)	0,5-1	0,05-0,1 <i>Na</i>	720-750
9	Флюс (35% <i>NaCl</i> , 40% <i>KCl</i> , 10% <i>NaF</i> , 15% Na_3AlF_6)	1-1,5	0,05-0,1 <i>Na</i>	740-760
10	Лигатура <i>Al-Sr</i> (10% <i>Sr</i>)	0,6-0,8	0,06-0,85 <i>Sr</i>	750-780
11	Лигатура <i>Cu-P</i> (9-11% <i>P</i>)	0,5-1	0,05-0,1 <i>P</i>	790-820
12	Смесь 20 % красного фосфора с 10% K_2ZrF_6 и 70% <i>KCl</i>	1,5-2	0,05-0,1 <i>P</i>	790-825
13	Смесь 58% K_2ZrF_6 с 34% порошка алюминия и 8 % красного фосфора	0,3-0,4	0,05-0,1 <i>P</i>	790-825
14	Фосфоорганические вещества (хлорофос, трифенилфосфат)	0,4-0,6	0,05-0,1 <i>P</i>	760-780

Примечание. Модификаторы 1-4 применяют для деформируемых сплавов. 5-10 – для модифицирования эвтектики доэвтектических *Al-Si* сплавов, 11-14 – для заэвтектических силуминов.

Модифицирование макроструктуры алюминиевых деформируемых сплавов повышает технологическую пластичность слитков и однородность механических свойств в поковках и штамповках.

Железо в алюминиевых сплавах образует твердые интерметаллиды – тройную промежуточную фазу β (*Al-Fe-Si*) и химическое соединение $FeAl_3$. Эти соединения кристаллизуются в форме грубых иглообразных кристаллов, резко снижающих пластические свойства сплавов. Нейтрализацию вредного влияния железа осуществляют введением в расплавы присадок марганца, хрома или бериллия. Незначительное количество (0,3-0,4%) этих присадок подавляют образование иглообразных кристаллов железистой составляющей, способствуют их коагуляции и выделению в компактной округлой форме за счет усложнения состава. Модифицирующие присадки вводят в расплав в виде лигатур при 750-780°С.

Литейные доэвтектические и эвтектические сплавы для измельчения

выделений эвтектического кремния модифицируют натрием или стронцием.

Металлический натрий вводят при 750-780°C на дно расплава с помощью колокольчика. Ввиду низкой температуры кипения (880°C) и большой химической активности введение натрия связано с некоторыми затруднениями – большим угаром модификатора и газонасыщением расплава, поскольку натрий хранят в керосине.

Поэтому в производственных условиях чистый натрий для модифицирования не применяют. Для этой цели используют соли натрия.

Модифицирование двойным модификатором (№6, табл. 2) ведут при 780-810°C. Применение тройного модификатора (№7) позволяет снизить температуру модифицирования до 730-750°C.

Для модифицирования сплав из плавильной печи переливают в ковш, который устанавливают на обогреваемый стенд. Металл подогревают до температуры модифицирования, снимают шлак и на поверхность расплава ровным слоем засыпают молотый и обезвоженный модификатор (1–2% от массы металла). Расплав с нанесенными на его поверхность солями выдерживают при температуре модифицирования 12-15 мин в случае использования модификатора №6 и 6-7 мин – модификатора №7. В результате реакции $6NaF + Al \rightarrow Na_3AlF_6 + 3Na$ происходит восстановление натрия, который оказывает модифицирующее воздействие на расплав. Для ускорения реакции и обеспечения более полного восстановления натрия корочку солей нарубают и замешивают на глубину 50-100 мм. Образующийся шлак сгущают добавлением фторида или хлорида натрия и удаляют с поверхности расплава.

Контроль качества модифицирования ведут по изломам проб и микроструктуре. Модифицированный сплав имеет мелкозернистый излом светло-серого цвета без блестящих площадок. После модифицирования сплав должен быть разлит по формам в течение 25-30 мин, так как более длительная выдержка сопровождается снятием эффекта модифицирования.

Использование универсального флюса (№8, табл. 2) позволяет совместить операции рафинирования и модифицирования силуминов. Сухой порошкообразный флюс в количестве 0,5-1,0% от массы расплава засыпают под струю металла во время перелива из плавильной печи в ковш. Струя хорошо перемешивает флюс с расплавом. Процесс идет успешно, если температура расплава не ниже 720°C. Для модифицирования используют также универсальный флюс №9, табл. 2. Этот флюс вводят в расплав в количестве 1,0-1,5% при 750°C в расплавленном состоянии. При использовании универсальных флюсов отпадает необходимость в перегреве расплава, уменьшается время обработки расплава, снижается расход флюса.

Существенными недостатками модифицирования натрием являются недостаточная длительность сохранения эффекта модифицирования и повышение склонности сплавов к поглощению водорода и образованию газовой пористости.

Хорошими модифицирующими свойствами обладает стронций. В отличие от натрия этот элемент медленнее выгорает из алюминиевых расплавов, что

позволяет сохранять эффект модифицирования до 2-3 ч; он в меньшей степени, чем натрий, увеличивает окисляемость силуминов и их склонность к газопоглощению. Для введения стронция используют лигатуру *Al-Sr* (10% *Sr*). Режим модифицирования стронцием приведен в табл. 2.

К числу модификаторов длительного действия относят также иттрий и сурьму, которые вводят в количестве 0,15-0,3%.

Заэвтектические силумины (>13% *Si*) кристаллизуются с выделением хорошо ограненных крупных частиц кремния. Обладая высокой твердостью и хрупкостью, первичные кристаллы кремния существенно затрудняют механическую обработку отливок и обуславливают полную потерю ими пластичности ($\delta = 0$). Измельчение первичных кристаллов кремния в этих сплавах осуществляют введением в расплав 0,05-0,1% фосфора. Для введения фосфора используют модификаторы 11-14.

Легирование сплавов. Легирование – это процесс введения в расплавленные или твердые металлы легирующих элементов с целью получения сплава заданного химического состава и придания ему требуемых механических, технологических или иных специальных свойств.

К легирующим элементам относят технически чистые элементы, вводимые в состав сплава в чистом виде или в составе лигатур.

Таким образом, в состав сплава входят основа, легирующие элементы и примеси.

Основой промышленных сплавов является, как правило, один металл, определяющий его важнейшие свойства и стоимость.

Примеси – это небольшие количества элементов, случайно попадающие в сплав из шихтовых материалов, топлива, атмосферы, шлаков, материала тигля или печи и т.д. Вредные примеси снижают свойства сплава. Их количество ограничивают государственными стандартами или техническими условиями. Остаточные примеси попадают в сплав либо при переплаве отходов, либо вторичных сплавов, а также после проведения некоторых металлургических обработок (модифицирования, раскисления, рафинирования). Нейтральные примеси обычно не оказывают заметного влияния на основные свойства сплава и поэтому не контролируются в процессе производства сплавов.

В настоящее время ГОСТами предусмотрено около 200 литейных сплавов и свыше 400 литейных сплавов изготавливают по различным техническим условиям. Общее количество сплавов цветных металлов быстро растет и совершенствуется. Например, 30 лет назад темп их роста был настолько велик, что число сплавов на основе алюминия удваивалось каждые 12-15 лет.

Разработка новых сплавов с заранее заданными свойствами является важной задачей литейного металловедения.

По техническим и экономическим параметрам выбирают группу легирующих элементов, которые целесообразно вводить совместно. Из этой группы легирующих элементов одни увеличивают механические или специальные, другие технологические или литейные свойства.

Выбор основы сплава определяется, прежде всего, условиями работы изделия из этого сплава и экономическими факторами.

Например, для транспортных средств, особенно летательных аппаратов, требуется легкость. Поэтому при их конструировании многие детали изготавливаются из сплавов на основе алюминия, магния и титана.

Для деталей, работающих при высоких температурах, в условиях интенсивного износа или коррозии требуются тугоплавкие, жаростойкие, коррозионностойкие и износостойкие сплавы на основе никеля, хрома, молибдена и других сплавов.

Выбор легирующих элементов производится по двойным диаграммам состояния основа сплава – легирующих элемент.

В настоящее время установлено, что существуют вполне определенные зависимости между параметрами диаграмм состояния и технологическими и эксплуатационными свойствами сплава, позволяющие выбрать оптимальный состав легирующих элементов.

Свойства сплавов зависят от того, какие соединения или фазы образовали компоненты сплава. Какие фазы образуются между компонентами сплава, устанавливается по диаграмме состояния. Поэтому, очевидно между видом диаграммы состояния и свойствами сплава существует определенная связь.

На рис. 11 приводятся четыре основных типа диаграмм состояний и соответствующие им закономерности изменения свойств сплава с изменением концентрации.

При образовании механических смесей (рис. 11, *а*) свойства сплава изменяются по линейному закону. Следовательно, значения свойств сплавов находятся в интервале между свойствами чистых компонентов *A* и *B*.

При образовании твердых растворов (рис. 11, *б*) свойства сплава изменяются по криволинейному закону, причем некоторые свойства (например, электросопротивление) могут значительно отличаться от свойств компонентов *A* и *B*. Распад раствора на две или более фазы ведет к повышению электропроводности.

При образовании ограниченных твердых растворов (рис. 11, *в*) свойства сплавов в интервале концентраций, соответствующим однофазным твердым растворам, изменяются по криволинейному, а в двухфазной области диаграммы – по линейному закону. Причем крайние точки на прямой являются свойствами чистых фаз предельно насыщенных твердых растворов, образующих данную смесь.

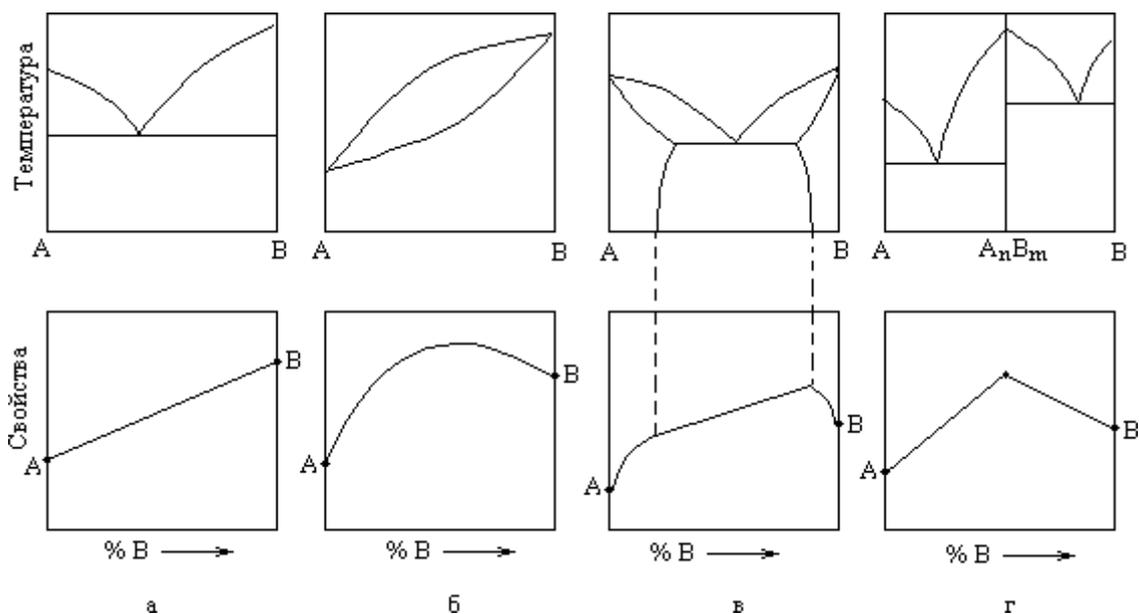


Рис. 11. Свойства сплавов и вид их диаграмм состояния (по Н.С. Курнакову)

Если образуются твердые растворы замещения, периоды решетки изменяются в зависимости от разности атомных диаметров растворенного элемента и растворителя.

В том случае, когда диаметр атома легирующего элемента больше диаметра атома растворителя – решетка увеличивается. Если диаметр атома легирующего элемента меньше диаметра атома растворителя решетка уменьшается.

При образовании твердых растворов внедрения параметры решетки увеличиваются.

Установлено, чем больше изменение параметров решетки при легировании, тем значительнее изменяются свойства. Причем, уменьшение параметров решетки металла-основы ведет к большему упрочнению, чем ее расширение (рис. 12).

Цинк, серебро и кремний незначительно изменяют параметр решетки алюминия. Поэтому следует ожидать лишь незначительного упрочнения металла (при этом структурные изменения не учитываются). Как видно из рис. 12 медь и магний резко изменяют параметр решетки алюминия, вследствие этого его упрочнение происходит весьма значительно. Неслучайно медь и магний входят в состав самых высокопрочных алюминиевых сплавов.

При образовании химического соединения на диаграмме концентрация химического соединения отвечает максимуму (или минимуму) на кривой (рис. 11, з) показан перелом прямой.

Следует отметить, что приведенные зависимости от вида диаграммы состояния не всегда подтверждаются опытом, так как в них не учитываются форма и размеры кристаллов, их взаимное расположение, температура и другие факторы.

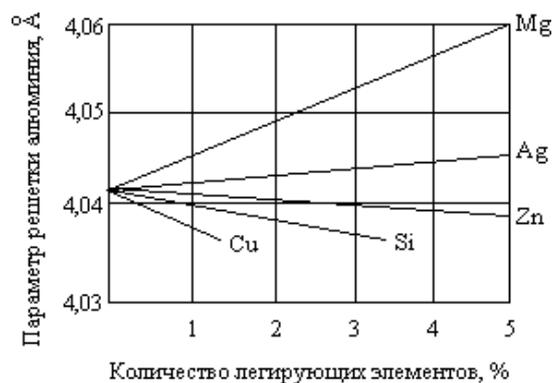


Рис. 12. Влияние легирующих элементов на изменение параметров решетки алюминия

На рис. 13 показана схема зависимости между двойной диаграммой состояния и механическими свойствами сплава. На участке концентраций *аб* характеристики прочности всегда возрастают. В пределах этого участка термическая обработка не оказывает влияния на свойства. На участке *бе* прочность продолжает расти, а термическая обработка ее может значительно изменить. Считается, что воздействие закалки и старения тем сильнее, чем больше искривлена линия предельной растворимости на диаграмме состояния *бв*. Если эта линия вертикальная прямая, после термической обработки упрочнение не увеличивается. При медленном охлаждении распад высокотемпературной фазы происходит с выделением грубых включений, и прочность незначительно возрастает при увеличении количества легирующего элемента.

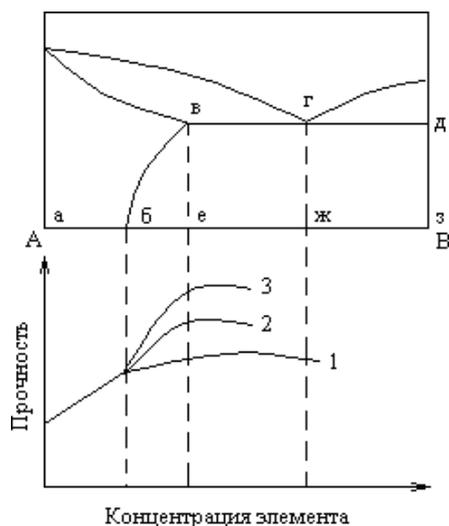


Рис. 13. Зависимость свойств сплава от диаграммы состояния

Пластичность сплава зависит не только от концентрации, но и от распределения добавки в структуре. Если коэффициент распределения мал, то легирующий элемент концентрируется по границам зерен и пластичность сплава резко падает даже при малых концентрациях добавки.

При средних величинах коэффициента распределения (0,1-1,0%) пластичность обычно снижается умеренно с увеличением количества легирующего элемента. Однако при введении некоторых добавок при коэффициенте распределения близком к единице пластичность растет одновременно с прочностью, достигая максимума на пределе растворимости.

Необходимо отметить, что легирующие добавки, вводимые для повышения механических и других служебных свойств, чаще всего ухудшают литейные свойства сплавов.

После выбора комплекса легирующих элементов оптимизируется состав сплава с определенной концентрацией каждой вводимой добавки и допусков на них. Назначаются предельные допустимые концентрации вредных примесей. Для решения этих задач проводятся активные эксперименты на основе математических и литейно-металловедческих теорий с использованием ЭВМ.

Современная литейная технология позволяет получить отливки из сплавов на любой основе с любыми легирующими элементами.

Принято делить процессы введения добавок в сплав на монолегирование и комплексное легирование. Монолегированными сплавами называют такие, которые содержат кроме основы только один легирующий элемент. Это, как правило, самый эффективный элемент из ряда легирующих добавок. Такими сплавами являются силумины, двойные латуни, некоторые алюминиево-магниевые сплавы и другие. При выборе состава решающим является определение концентрации единственного легирующего элемента, нижний предел которого – концентрация на уровне примеси, а верхний зависит от природы сплава. Для высокотехнологичности сплава с невысокими требованиями к прочности это будет эвтектическая концентрация, а для сплава, от которого требуется высокая прочность – предельная растворимость. В связи с этим нецелесообразно в монолегированных сплавах применять малорастворимые добавки.

При оценке рациональной концентрации легирующего элемента большую роль играет ее стоимость. При стоимости добавки близкой к стоимости основы сплава или даже более низкой, целесообразно вводить ее до самых высоких концентраций. Для более дорогих добавок разумно введение при умеренных концентрациях.

Одновременное введение в сплав нескольких легирующих элементов считается комплексным легированием. Подобные элементы могут быть взяты из одного или нескольких рядов легирующих элементов. Такую группу добавок называют легирующим комплексом.

Целесообразность и необходимость комплексного легирования определяется требованием одновременного обеспечения определенного уровня нескольких свойств сплава, снижением отрицательного влияния вредных примесей и некоторых легирующих добавок, а также возможным изменением свойств сплава вследствие взаимодействия между собой или основой двух или более легирующих элементов.

Известно, что некоторые элементы, повышая одно из нужных свойств,

снижают другие, уровень которых тоже должен быть обеспечен. Каждое свойство сплава повышается элементами, составляющими свой ряд легирующих добавок. Отдельные элементы могут входить в разные ряды, но занимать в них по значению различные положения.

В качестве примеров выбора такого ряда можно привести обеспечение максимальной прочности конструкционного сплава при заданном уровне пластичности, вязкости и невысокой стоимости легирующих элементов; повышение технологических характеристик сплава при сохранении существующего уровня механических свойств (например, путем модифицирования); повышение прочности электропроводного сплава при минимальном повышении электросопротивления; обеспечение минимальной стоимости комплекса легирующих добавок, при сохранении заданного уровня механических свойств сплава при приемлемых технологических свойствах и т.д.

Весьма существенно влияние вредных примесей на технологические и физико-механические свойства сплавов. Устранение их воздействия является очень важной задачей, особенно в тех случаях, когда эти примеси трудно или невозможно удалить металлургическими методами. Влияние таких примесей сводится, как правило, к концентрации соответствующих элементов по границам зерен и к образованию неметаллических или газовых включений, или хрупких интерметаллидов, или легкоплавких эвтектик. Хотя и не универсальным, но часто действенным способом подавления их влияния является введение в состав сплава добавок, образующих устойчивые, тугоплавкие соединения с вредными примесями, обладающими малой растворимостью в основе сплава. Так для связывания кислорода в железных сплавах вводят кремний, марганец, алюминия; в медных – фосфор; в никелевых – кремний, марганец, магний, бор. Для связывания серы в железных сплавах вводят марганец, РЗМ, а в никелевых – цирконий, бор, РЗМ. Для связывания водорода в медных сплавах – литий и другие металлы.

Часто при введении легирующих элементов улучшаются одни свойства и уменьшаются другие. В связи с этим часто вводят модификаторы в эвтектические сплавы, добавки молибдена или вольфрама в конструкционные стали легированные хромом и никелем (без этих добавок стали, содержащие хром и никель обладают хрупкостью); добавки титана в нержавеющие стали, легированные большим количеством хрома, который может вызвать интеркристаллитную коррозию.

Наибольший интерес представляют добавки, которые, взаимодействуя между собой и основой, более значительно улучшают свойства сплава, чем каждый из этих элементов по отдельности. Такие добавки взаимно усиливают свое воздействие. Такой эффект возможен тогда, когда добавки взаимно увеличивают свою растворимость в основе сплава. На тройных диаграммах состояния это должно проявиться в появлении выпуклой границы тройного твердого раствора в плоскости солидуса тройной эвтектики.

Различают объемные и поверхностные методы легирования. При объемных методах легирующие элементы вводятся в жидкие металлы и

равномерно распределяются по всему объему отливки. Введено понятие микролегированные, если остаточное количество легирующего элемента менее 0,1 % и макролегированные.

Иногда легированные сплавы могут быть получены не только специальным введением легирующих элементов, но и с применением определенных шихтовых материалов, в состав которых входят легирующие элементы. Такие сплавы называют природнолегированными. Во всех других случаях легирование является искусственным.

Наиболее часто при объемном легировании легирующие элементы вводятся в плавильный агрегат в твердом или жидком виде. При этом легирующие элементы могут вводиться в завалку совместно с другими шихтовыми материалами, после расплавления всей шихты или перед выпуском металла из печи. Такой метод легирования позволяет в неограниченном количестве вводить составляющие сплава без каких-либо технологических нарушений, кроме более значительного угара легирующих элементов.

Лигатуры и их приготовление. Для приготовления легких сплавов используют отходы производства (крупногабаритные и переплав стружки), чушковые металлы и лигатуры.

В виде лигатур вводят такие тугоплавкие компоненты, как медь, марганец, кремний, титан, хром, никель, бериллий, неодим, лантан, цирконий и др. Лигатуры представляют собой сплавы алюминия или магния с высоким содержанием легирующих элементов. Лигатуры, применяемые для приготовления легких сплавов, должны удовлетворять следующим требованиям: низкая температура плавления; однородность по химическому составу; возможно большее содержание легирующих компонентов; достаточная хрупкость для удобства размельчения при шихтовке.

В зависимости от масштаба производства лигатуры изготавливают в тигельных или отражательных печах. В литейных цехах малой мощности лигатуры готовят в тиглях, в цехах заготовительного литья их готовят в отражательных печах. Объем плавки в первом случае колеблется от 50 до 250-300 кг, во втором – от 6 до 10 т.

Наиболее широко применяют двойные лигатуры: *Al-Cu*, *Al-Mn*, *Al-Si*, *Al-Ti*, *Al-Ni*, *Al-Fe*, *Al-Zr*, *Mg-Mn*, *Mg-Zr*, *Mg-Nd* и др., а также тройные: *Al-Mg-Mn*, *Al-Cu-Ni* и др. и четверную *Al-Cu-Mn-Ti*.

В качестве шихты при приготовлении лигатур применяют медь не ниже марки М2, марганец для алюминиевых сплавов не ниже марки Мр4 и для магниевых – не ниже Мр2, хром – не ниже марки Х2, никель – не ниже Н3, кремний – не ниже Кр2. При приготовлении алюминиево-титановой лигатуры применяют стружку сплава ВТ1, при приготовлении алюминиево-железной лигатуры – отходы низколегированной стали. Большинство алюминиевых лигатур готовят на основе алюминия марок А, А5 и А0 с использованием сухой и чистой стружки, получаемой в литейном цехе. При приготовлении циркониевых лигатур с алюминием и магнием применяют соли: фторцирконат калия или четыреххлористый цирконий или сплав солей, состоящий из 66%

фторцирконата калия, 26% хлористого лития и 8% фтористого кальция.

Алюминиево-кремниевая лигатура. Содержит обычно 18-25% кремния (и редко 33%). Кремний вводят небольшими порциями в расплавленный и подогретый до 850-900°C алюминий в виде кусков величиной с грецкий орех. Кремний хорошо растворяется в алюминии только в том случае, если он не покрывается окисной пленкой. Ввиду того, что кремний обладает меньшей плотностью, чем алюминий, куски его всплывают на поверхность ванны и быстро окисляются. Для предотвращения окисления кремний рекомендуется вводить завернутым в алюминиевую фольгу или в графитовом колокольчике. По растворению введенной порции кремния расплав быстро перемешивают и вводят следующую порцию. После растворения всего кремния лигатуру рафинируют и разливают в изложницы. В цехах заготовительного литья лигатуру разливают в стальные водоохлаждаемые изложницы, устанавливаемые на конвейере. Температура разливки 700-800°C. Алюминиево-кремниевая лигатура имеет серовато-матовый оттенок, несколько напоминающий цвет металлического кремния.

Алюминиево-медная лигатура. Содержит 33 либо 50% меди. Наиболее часто готовят лигатуру с 50% меди. Эта лигатура обладает невысокой температурой плавления (575°C), однородна по химическому составу и в достаточной мере хрупка. Кроме того, такая лигатура облегчает расчет шихты. Приготовление алюминиево-медной лигатуры – достаточно простой процесс, обеспечивающий хорошее ее качество. В печь загружают навеску алюминия. По расплавлению алюминия и доведения его температуры до 800-850°C вводят медь. Медь применяют марок М0, М1 и М2. После этого расплав тщательно перемешивают. После растворения всего алюминия расплав охлаждают до 700°C и рафинируют. Удаляют с поверхности шлак и при 700-800°C разливают в изложницы. Алюминиево-медную лигатуру получают и другим способом. Пластинки меди размером 100×100 мм после подогрева до 400-600°C вводят небольшими порциями в расплавленный и перегретый до 700-750°C алюминий. При введении меди расплав перемешивают. После расплавления последней порции меди расплав перемешивают, снимают шлак и разливают в изложницы. Алюминиево-медная лигатура в изломе характеризуется мелкокристаллическим строением и серебристо-белым цветом с ярко выраженным металлическим блеском.

Алюминиево-марганцевая лигатура. Содержит обычно 8-12% марганца. Температура плавления такой лигатуры около 780-800°C. Алюминиево-марганцевая лигатура с содержанием более 12% марганца обладает слишком высокой температурой плавления, поэтому применять такую лигатуру не рекомендуется. Алюминиево-марганцевую лигатуру готовят путем растворения размельченного марганца (в виде кусков величиной 15-20 мм) в расплавленном и перегретом до 1000-1100°C алюминии. Марганец вводят небольшими порциями подогретым до 400-600°C. При введении очередной порции марганца расплав тщательно размешивают графитовой или титановой мешалкой. После растворения всего марганца лигатуру рафинируют и разливают в изложницы. Чтобы облегчить размельчение недостаточно

хрупкой лигатуры и уменьшить ликвацию марганца, лигатуру при температуре 900-1000°C разливают в плиты толщиной не более 15-20 мм.

Алюминиево-марганцево-магниева лигатура. Получается путем добавки магния к расплаву двойной алюминиево-марганцевой лигатуры после ее рафинирования. При нахождении тигля в горне вводят половину взвешенного магния. Вторую порцию магния вводят после выемки тигля из горна перед разливкой лигатуры по изложницам.

Алюминиево-никелевая лигатура. Содержит 10- 20% никеля, химически достаточно однородна и сравнительно легкоплавка. Алюминиево-никелевую лигатуру готовят путем растворения никеля в перегретом до 850-950°C алюминии. Никель в виде пластин размером 100×100 мм, предварительно подогретых до 400-600°C, вводят небольшими порциями при тщательном размешивании расплава. По растворению всего никеля расплав рафинируют, после чего с поверхности расплава удаляют шлак и разливают при температуре 800-900°C. Алюминиево-никелевая лигатура в изломе серовато-белого цвета.

Алюминиево-медно-никелевая лигатура. Получается следующим образом: сначала расплавляют медь, в которую вводят небольшую порцию алюминия (1/6-1/8 расчетного количества), затем при температуре 1100-1150°C в несколько приемов вводят предварительно подогретый никель, тщательно размешивая расплав. После растворения всего никеля вводят остальной алюминий, также предварительно подогретый. После удаления шлака готовую лигатуру разливают по изложницам. Тройная лигатура содержит обычно 20- 25% никеля, 30-40%, меди, остальное алюминий.

Алюминиево-железная лигатура. Обычно содержит 8-10% железа. Ее готовят так же, как и алюминиево-марганцевую или алюминиево-никелевую лигатуру. В перегретом до 900-1000°C алюминии порциями растворяют железо, которое вводят в виде кусков величиной 15-20 мм, предварительно подогретых до 400-600°C. Расплав необходимо тщательно перемешивать, так как железо в количествах больше 6-8% медленно растворяется в расплаве и сильно ликвирует. Перемешивать лучше деревянными гребками. Эту лигатуру рекомендуется разливать при температуре 900-1000°C в плитки толщиной не более 20 мм.

Алюминиево-бериллиевая лигатура. Содержит 2-4% бериллия. Эту лигатуру можно готовить в вакуумных и индукционных высокочастотных печах с применением графитового тигля. При приготовлении алюминиево-бериллиевой лигатуры необходимо пользоваться «Временной инструкцией по технике безопасности и промсанитарии при приготовлении лигатуры алюминий-бериллий с содержанием бериллия 2-4%». В соответствии с этой инструкцией необходимо, чтобы печь для приготовления лигатуры находилась в укрытии, обеспеченном местной вытяжной вентиляцией. Загрузочное отверстие печи снабжено рукавом из асбестовой ткани. Вентиляционная система должна обеспечивать двухступенчатую очистку удаляемого воздуха: на первой ступени используются фильтры с резиновой или мраморной крошкой, стекловатой, алюминиевой промасленной стружкой

или решетчатые фильтры, на второй ступени – фильтры из аналитической ткани Петрянова. Скорость движения воздуха – не менее 1 м/сек. Для получения лигатуры бериллий вводят в расплавленный и перегретый до 1000°C алюминий небольшими порциями при тщательном перемешивании расплава. Плавку ведут под флюсом, состоящим из 65% хлористого бария и 35% фтористого бария, или из 90% хлористого бария и 10% хлористого калия. При температуре 750-800°C расплав рафинируют обезвоженным хлористым цинком или хлористым марганцем в количестве до 0,2% от массы шихты. После тщательного перемешивания и удаления шлака лигатуру при температуре 750-800°C разливают по изложницам. Иногда делают тройную алюминиево-бериллиево-магниевую лигатуру. В этом случае к двойной алюминиево-бериллиевой лигатуре добавляют магний.

Алюминиево-титановая лигатура. Чаще всего содержит 2-3% титана. Получение лигатур, богатых титаном, и употребление их весьма затруднительно, так как температуры плавления алюминиево-титановых сплавов очень высоки. Так, например, температура плавления алюминиевого сплава с 5% титана равна 1000°C. Для приготовления лигатуры применяют алюминий марок А7, А6 и А5, а также сплав АД1. Так как добавка титана в алюминиевые сплавы обычно не превышает 0,1-0,2%, то практически удобной для употребления является лигатура, содержащая около 2% титана. Титан или сплав ВТ1 в виде небольших кусков диаметром 5 мм или пластин размером 100×100 мм или в виде стружки в подогретом до 400-500°C состоянии небольшими порциями вводят в расплавленный и перегретый до 1100-1200°C алюминий при перемешивании титановыми или графитовыми мешалками. По окончании введения титана расплав перемешивают, снимают шлак и лигатуру разливают по изложницам. Температура разливки 950-1050°C. Хорошо приготовленная алюминиево-титановая лигатура в изломе имеет мелкозернистое строение с ярко выраженным металлическим блеском и равномерно распределенными вкраплениями титана золотистого цвета.

Тройная алюминиево-титано-магниевая лигатура получается путем добавки магния к двойной лигатуре. Присадка магния производится после рафинирования двойной лигатуры.

Алюминиево-циркониевая лигатура. Содержит около 1,5% циркония. Для ее приготовления используют алюминий марок А7 и А6. Алюминиево-циркониевая лигатура может быть получена путем введения в расплавленный и перегретый до 1100-1200°C алюминий фторцирконата калия или при температуре 850-900°C сплава солей, состоящего из 66% фторцирконата калия, 26% хлористого лития и 8% фтористого кальция. На 100 вес. ч. алюминия берут 20 вес. ч. фторцирконата калия и 20 вес. ч. криолита. Солевою смесь замешивают порциями массой по 1,5-2,0 кг. После введения последней порции солевой смеси расплав перегревают до 1000-1100°C и после удаления шлака и флюса разливают в изложницы, подогретые до 200-250°C.

Лигатура алюминий-медь-марганец-титан. Содержит обычно около 30% меди, 5% марганца, 2% титана. Для этой лигатуры применяют медь марки М0. После расплавления чушкового алюминия и доведения температуры расплава

до 800-1000°C вводят медь, затем при 1100-1200 °С титановую стружку небольшими порциями или лопатой. Последним при 1000-1100°C вводят марганец. Разливать четверную лигатуру по изложницам рекомендуется при температуре 1000-1100°C.

Алюминиево-хромовая лигатура. Содержит обычно около 3% хрома. Для ее приготовления применяют алюминий марок АЗ и А0, сплав АД1 и хром марок Х0, Х1 и Х2. Хром вводят в расплавленный и перегретый до 1000-1100°C алюминий. Разливают эту лигатуру по изложницам при температуре 850-950°C.

Алюминиево-ванадиевая лигатура. Содержит около 3% ванадия. Готовят на тех же сортах алюминия, что и алюминиево-хромовую. Эту лигатуру различают по изложницам при температуре 950-1000°C.

Магниево-марганцевая лигатура. Содержит обычно 4-5% марганца. Во избежание засорения магниевых сплавов кремнием (при приготовлении лигатуры в графитовом тигле) магниево-марганцевую лигатуру рекомендуется готовить в железных алитированных тиглях. Магниево-марганцевую лигатуру готовят следующим образом. В нагретый тигель насыпают небольшое количество флюса ВИЗ (100 г на 10 кг шихты). После этого в тигель загружают чушковый магний, пересыпанный флюсом. Предварительно размельченный марганец небольшими порциями вводят в расплавленный и подогретый до 880-950°C магний. После ввода очередной порции поверхность расплава посыпают флюсом, и расплав тщательно перемешивают. Желательно дать расплаву выстоять при указанных температурах, чтобы обеспечить более полное растворение марганца в магнии и более однородное его распределение в ванне жидкого металла. В целях получения более однородной по химическому составу лигатуры рекомендуется разливать ее по изложницам при температуре не ниже 750°C, так как с понижением температуры растворимость марганца в магнии уменьшается, и он выпадает из расплава. Для защиты струи разливаемого металла от загорания ее припудривают серным цветом. Во избежание загрязнения лигатуры флюсовыми и шлаковыми включениями сливать весь расплав из тигля не разрешается.

Магниево-циркониевая лигатура. Получается путем сплавления 50% фторцирконата калия, 20-25% карналлита и 25% магния. Для приготовления двойной лигатуры используют сварные из листовой стали специально предназначенные для этой цели тигли емкостью до 200 кг. В тщательно очищенный и нагретый докрасна тигель загружают карналлит, расплавляют его и при температуре 700-750°C дают выдержку до прекращения бурления, соответствующего удалению влаги. После этого при температуре 750-800°C порциями замешивают фторцирконат калия до получения однородной расплавленной массы. Потребное количество магния расплавляют под флюсом в отдельном тигле. Нагретый до 680-750°C магний заливают в тигель с расплавленными солями и полученную смесь перемешивают в течение 10-15 мин до прекращения выделения дыма. По окончании реакции из тигля при температуре 720°C сливают солевую часть, содержащую десятые доли

процента циркония, оставляя в тигле более тяжелую лигатуру. Последнюю частично сливают, частично выгребают из тигля ложкой в небольшие чушковые изложницы. Разливку двойной лигатуры производят с припудриванием струи серным порошком. Полученная таким образом лигатура содержит 25-50% циркония.

Использование шлак-лигатуры для легирования цирконием магниевых сплавов имеет свои преимущества по сравнению со сплавом солей: более высокое содержание циркония в сплаве; приготовление рабочего сплава при малых плавках непосредственно в стационарных и выемных тиглях. Однако приготовление сплава солей является менее сложным и более дешевым, чем получение шлак-лигатуры.

За последнее время широкое применение нашел способ введения циркония из двойной магниево-циркониевой лигатуры, выпускаемой металлургической промышленностью. Двойная магниево-циркониевая лигатура содержит не менее 15% циркония и выпускается в виде чушек массой 10-12 кг.

Особенности технологии производства фасонных отливок. По объему приемо-сдаточных испытаний отливки из алюминиевых сплавов относят ко II и III группам. По химическому составу и механическим свойствам они должны соответствовать ГОСТ 2685-75.

Изготовление фасонных отливок из алюминиевых сплавов производится всеми известными способами литья. Около 70-80% отливок получают литьем в формы многократного использования (в кокиль, под давлением, под низким давлением) и 20-30% – литьем в разовые формы (песчаные, гипсовые, оболочковые, по выплавляемым моделям). Назначение того или иного способа литья для изготовления конкретной отливки определяется уровнем требований к их качеству (механическим свойствам, точности размеров, чистоте поверхности), техническими возможностями каждого из способов литья и экономическими соображениями (необходимостью изготовления отливки с минимальными затратами труда и материалов и минимальной себестоимостью). Литье в металлические формы позволяет получать отливки с более высоким уровнем свойств и меньшим расходом металла, чем литье в разовые формы. Поэтому для крупносерийного и массового производства отливок из алюминиевых сплавов экономически целесообразными являются литье в кокиль и под давлением, а в серийном и мелкосерийном производстве – литье в разовые формы.

Высокая склонность алюминиевых расплавов к окислению, насыщению водородом, вспениванию при перепадах в полости литейной формы и образованию завихрений, вызываемых высокими скоростями движения металла, являются причинами основных видов брака отливок – газовой пористости, шлаковых включений и оксидных плен. Отливки с такими дефектами не обладают необходимыми гидро- и пневмоплотностью, механическими и эксплуатационными свойствами. Поэтому при разработке технологии изготовления фасонных отливок любым из способов литья основное внимание наряду с размерной точностью уделяют предотвращению образования завихрений и перепада уровня расплава в полости литейной

формы, созданию условий для спокойного заполнения формы и отделения шлаковых и других включений в процессе литья, обеспечению направленной кристаллизации отливок и подавлению газоусадочной пористости.

При разработке технологии изготовления отливок необходимо также учитывать особенности отдельных групп алюминиевых сплавов.

Сплавы I группы, обладающие хорошими литейными свойствами, могут быть использованы для изготовления сложных по конфигурации отливок без особого опасения образования в них трещин при затрудненной усадке. Основным недостатком силуминов является склонность к образованию рассеянной газовой пористости в отливках. Поэтому при литье силуминов особое внимание уделяют рафинированию расплавов от растворенного водорода.

Сплавы II группы имеют более широкий, чем сплавы I группы, интервал кристаллизации и менее склонны к образованию газовой пористости. Изготовление сложных по конфигурации отливок из этих сплавов требует тщательной разработки теплового режима форм.

Сплавы III группы обладают широким интервалом кристаллизации и низкими литейными свойствами. Большая линейная усадка и склонность к образованию трещин при затрудненной усадке обуславливают применение их для изготовления отливок несложной конфигурации, без поднутрений, с равномерными по толщине стенками. Внутренние полости в отливках из этих сплавов выполняют обычно податливыми песчаными стержнями; при использовании металлических стержней их необходимо своевременно удалять из отливки. Отливки из этой группы сплавов склонны к короблению из-за неравномерного охлаждения в кокилях. Поэтому в конструкциях отливок предусматривают ребра жесткости и технологические стяжки. Для снятия термических напряжений отливки иногда подвергают отжигу.

Сплавы IV группы склонны к образованию усадочных трещин, имеют большую линейную усадку и предрасположены к окислению и образованию оксидных плен. Отливки из сплавов с высоким содержанием магния отличаются хрупкостью и требуют очень осторожного обращения при извлечении из кокиля. Из сплавов этой группы изготавливают отливки простой конфигурации.

Сложнолегированные сплавы V группы обладают повышенной склонностью к образованию трещин при затрудненной усадке. При тщательной отработке теплового режима литья из сплавов можно изготавливать отливки сложной конфигурации.

Литье в песчаные формы. Из перечисленных выше способов литья в разовые формы наиболее широкое применение при изготовлении отливок из алюминиевых сплавов получило литье в сырые песчаные формы. Это обусловлено невысокой плотностью сплавов, небольшим силовым воздействием металла на форму и низкими температурами литья (680-800°C).

Для изготовления песчаных форм используют формовочные и стержневые смеси, приготовленные из кварцевых и глинистых песков (ГОСТ 2138-74), формовочных глин (ГОСТ 3226-76), связующих и вспомогательных

материалов.

Выполнение полостей в отливках осуществляют с помощью стержней, изготавливаемых в основном по горячим (220-300°C) стержневым ящикам. Для этой цели используют плакированный кварцевый песок или смесь песка с термореактивной смолой и катализатором. Для изготовления стержней широко используют однопозиционные пескострельные автоматы и установки, а также карусельные многопозиционные установки.

Стержни, подвергающиеся сушке, изготавливают на встряхивающих, пескодувных и пескострельных машинах или вручную из смесей с масляными (4ГУ, С) или водорастворимыми связующими. Продолжительность сушки (от 3 до 12 ч) зависит от массы и размеров стержня и определяется обычно опытным путем. Температуру сушки назначают в зависимости от природы связующего: для масляных связующих 250-280°C, а для водорастворимых 160-200°C.

Для изготовления крупных массивных стержней все большее применение получают смеси холодного твердения (ХТС) или жидкоподвижные самотвердеющие смеси (ЖСС). Смеси холодного твердения в качестве связующего содержат синтетические смолы, а катализатором холодного твердения обычно служит ортофосфорная кислота. Смеси ЖСС содержат поверхностно-активное вещество, способствующее образованию пены.

Соединение стержней в узлы производят клеевой или путем заливки алюминиевых расплавов в специальные отверстия в знаковых частях. Усадка сплава при охлаждении обеспечивает необходимую прочность соединения.

Плавное без ударов и завихрений заполнение литейных форм обеспечивается применением расширяющихся литниковых систем с соотношением площадей сечений основных элементов $F_{ст}:F_{шл}:F_{пит} = 1:2:3; 1:2:4; 1:3:6$ соответственно для нижнего, щелевого или многоярусного подвода металла к полости литейной формы (рис. 14).

Тип литниковой системы выбирают с учетом габаритов отливки, сложности ее конфигурации и расположения в форме. Заливку форм для отливок сложной конфигурации небольшой высоты осуществляют, как правило, с помощью нижних литниковых систем. При большой высоте отливок и тонких стенках предпочтительно применение вертикально-щелевых или комбинированных литниковых систем. Формы для отливок малых размеров допустимо заливать через верхние литниковые системы. При этом высота падения струи металла в полость формы не должна превышать 80 мм.

Для уменьшения скорости движения расплава при входе в полость литейной формы и лучшего отделения взвешенных в нем оксидных плен и шлаковых включений в литниковые системы вводят дополнительные гидравлические сопротивления – устанавливают сетки (металлические или из стеклоткани) (рис. 15) или ведут заливку через зернистые фильтры.