

Рис. 3.22. Положение фронта кристаллизации в отливке в различные периоды времени затвердевания металла в форме

термической узел отливки, на котором установлен при-  
быль. Сечение шейки прибыли может быть несколько  
больше указанного диаметра вписанной окружности, что  
качестве такого термического узла принята окружность, если в  
стенка отливки. Длина шейки прибыли, в основном, протяжённая  
делается шириной реза, который оставляет режущий инст-  
руммент, используемый для отделения отливки от прибыли.  
Как правило, длина шейки прибыли находится в пределах  
от 3 до 15 мм.

Используемые в литье по выплавляемым моделям  
прибыли классифицируют:

- по месту (уровню) их установки на отливке (верхние,  
нижние, боковые);
- по конфигурационному признаку (шаровые, полушаро-  
вые, цилиндрические, конические и пр., а также сегмент-  
ные и кольцевые);
- по способу повышения эффективности их работы (ат-  
мосферного давления, газового давления, утеплённые,  
обогреваемые и т.п.).

Кроме того, прибыли могут быть открытыми или закры-  
тыми, что схематично представлено на рис. 3.23.

При всех прочих равных условиях, прибыли открытого типа менее эффективны,  
чем прибыли закрытого типа. Наличие открытой поверхности расплава в прибыли  
открытого типа приводит к весьма интенсивной теплоотдаче с этой поверхности  
расплава в атмосферу. В связи с этим, по сравнению с прибылями закрытого типа, при  
всех прочих равных условиях, прибыли открытого типа имеют объём в 1,5...2,5 раза  
большой. С целью повышения эффективности работы прибылей открытого типа реко-  
мендуется, непосредственно после оконча-  
ния заливки КО или в процессе заполнения  
открытой прибыли расплавом, в её полость  
вести предварительно прокалённую при  
500...950°C пластину (~20x20x60 мм), выре-  
занную из пеношамотного кирпича марки ШЛ-  
1,3 или ШЛ-0,9. После заполнения открытой  
прибыли расплавом пластина будет  
закрывать часть свободной поверхности зеркала расплава в прибыли, что улучшит  
условия питания отливки.

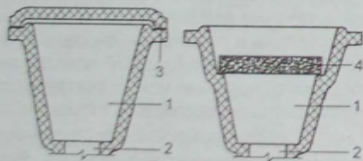


Рис. 3.24. Схемы прибылей открытого типа: 1 – прибыль; 2 – шейка прибыли; 3 – крышка керамическая; 4 – пластина пеношамотная

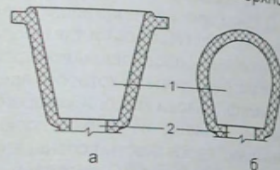


Рис. 3.23. Схема прибыли открытого (а) и закрытого (б) типа: 1 – прибыль; 2 – шейка прибыли

Помимо пластины из пеношамотного кирпича, можно использовать лист хризотилового асбеста, уложенный на торец прибыли непосредственно по окончании заливки формы. Кроме того, уменьшить теплоотдачу со свободной поверхности расплава в прибыли можно путём установки, ещё до начала прокаливании КО, керамической крышки или пеношамотной пластины, как, например, это представлено на рис. 3.24.

В литье по выплавляемым моделям наибольшее распространение получили прибыли закрытого типа, как наиболее экономичные и эффективные. Прибыли закрытого типа классифицируют по форме (шаровые, конические, полшаровые цилиндрические, конические и т.п.), а также по способу повышения эффективности их работы. Основной целью повышения эффективности является увеличение радиуса (дистанции) действия прибыли (прибыли повышенного газового давления) или повышение выхода годного за счёт уменьшения объёма прибыли (прибыли утеплённые и обогреваемые).

Форма прибыли, при всех прочих равных условиях, также как и утепление прибыли, существенно влияет на длительность пребывания металла в прибыли в жидком состоянии и, соответственно, предопределяет объём металла и эффективность жидком состоянии необходимо, при неизменном объёме металла в прибыли в уменьшить теплоотдачу с её поверхности (уменьшить площадь поверхности прибыли при её неизменном объёме, либо утеплить прибыль).

На рис. 3.25 представлены схемы закрытых прибылей различной формы с указанием численного значения их модуля охлаждения как величины, характеризующей относительное время затвердевания расплава в прибыли и, соответственно, эффективность работы прибыли. Все прибыли, представленные на рис. 3.25, имеют одинаковый объём. Для сравнения, на рис. 3.25,а представлена прибыль в форме куба.

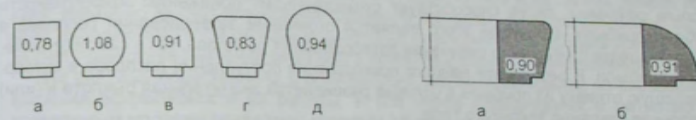


Рис. 3.25. Формы закрытых прибылей.

Рис. 3.26. Формы сечений кольцевых прибылей с трапециевидным (а) и секторным (б) профилями сечения

Из данных, представленных на рис. 3.25 следует, что наименьший модуль (наименьшее время затвердевания и, соответственно, наименьшую эффективность) имеет прибыль в форме куба (см. рис. 3.25,а). Наибольший модуль (наибольшее время затвердевания и, соответственно, наибольшую эффективность) имеет шаровая (сферическая) прибыль (см. рис. 3.25,б).

В цехах литья по выплавляемым моделям, в настоящее время наибольшее распространение получили прибыли конической (см. рис. 3.25,г) и полшаровой конической (см. рис. 3.25,д) формы. Сравнение величины модуля охлаждения прибыли конической формы (см. рис. 3.25,г) с величиной модуля охлаждения прибылей других форм показывает, что, с точки зрения эффективности работы, прибыль конической формы значительно уступает прибылям с формами (за исключением прибыли в форме куба), представленными на рис. 3.25.

Сечения прибылей кольцевого типа, с формой поперечного сечения трапециевидного и секторного типов, представлены на рис. 3.26, где числа на изображении сечения указывают величину модулей охлаждения рассматриваемых прибылей при их одинаковом объёме. Близость величин модулей охлаждения рассматриваемых прибылей свидетельствует, что обе прибыли, с точки зрения длительности затвердевания металла в прибыли, практически равноценны.



Проектируя прибыль, следует обращать внимание на её конфигурацию, как фактор, определяющий эффективность её работы. С этой точки зрения, в качестве примера на рис. 3.27 представлены схемы неправильного (см. рис. 3.27, а, в) и правильного (см. рис. 3.27, б, г, д, е) выполнения прибылей.

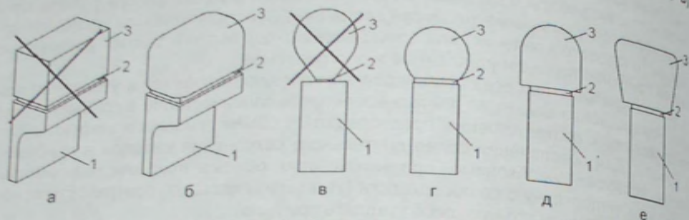


Рис. 3.27. Схемы неправильного (а, в) и правильного (б, г, д, е) выполнения прибылей: 1 — отливка; 2 — шейка прибыли; 3 — прибыль

Как было отмечено выше, наибольшей эффективностью работы обладают прибыли, имеющие более компактную форму. Поэтому форма прибыли, представленная на рис. 3.27, б более предпочтительна, чем форма прибыли, представленная на рис. 3.27, а. Кроме этого, чрезмерно удлиненная шейка прибыли, в сочетании с её малым сечением, также способствует существенно понижению эффективности работы прибыли. Причиной этого является окончание затвердевания расплава в области шейки прибыли до окончания затвердевания расплава, как в самой отливке, так и прибыли. В результате раннего прекращения поступления расплава в затвердевающую отливку из прибыли в отливке развивается значительная рыхлота и (или) осадочная раковина закрытого типа.

У прибылей кольцевого типа форма и размеры шейки также определяют эффективность работы прибыли. Помимо этого, у кольцевых прибылей шейка прибыли оказывает существенное влияние на точность отливки.

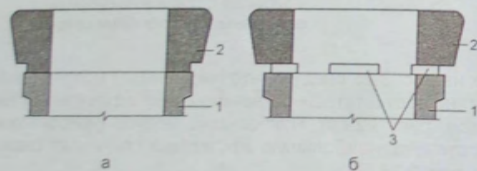


Рис. 3.28. Схемы разрезов моделей кольцевых прибылей: 1 — отливка; 2 — прибыль; 3 — "окна" в шейке прибыли

На рис. 3.28, а представлено кольцо, в котором прибыль 2 сообщается с отливкой 1 кольцевой шейкой по всей торцевой поверхности отливки. На рис. 3.28, б представлена отливка 1, на которой установлена прибыль 2 кольцевого типа, сообщаемая с ней посредством сегментных шеек. В данном случае сегментные шейки образовались в результате выполнения в кольцевой шейке равноудалённых друг от друга технологических окон 3.

По высоте технологическое окно соответствует высоте шейки прибыли, а протяжённость окна — 1...3 диаметрам окружности, вписанной в термический узел отливки, на котором прибыль установлена.

Использование технологических окон в шейке прибыли позволяет стабилизировать размерную точность отливки за счёт уменьшения эллипсности рабочих полостей

КО в области верхнего торца отливки. Основным условием успешного использования кольцевой прибыли с технологическими окнами в шейке прибыли является обеспечение такого подвода расплава в прибыль по литниковым ходам, который бы не позволял истекать расплаву из литникового хода на поверхность, который бы являющейся технологическое окно в шейке прибыли. В противном случае, оформившись в виде славов, расплава, приводящее к образованию в отливке корольков и, для славов склонных к пленообразованию, окисных плен.

Как было отмечено выше, одним из основных условий хорошей работы прибыли является сохранение в ней расплава до окончания процесса затвердевания расплава в термическом узле отливки или её стенке, на которой установлена прибыль. В процессе затвердевания расплава в прибыль по литниковым ходам, который бы не позволял истекать расплаву из литникового хода на поверхность, который бы являющейся технологическое окно в шейке прибыли. В противном случае, оформившись в виде славов, расплава, приводящее к образованию в отливке корольков и, для славов склонных к пленообразованию, окисных плен.

К числу показателей, определяющих эффективность работы прибыли, относится дистанция (радиус) действия прибыли. Работа прибыли тем эффективнее, чем больше дистанция (радиус) её действия.

Увеличить дистанцию (радиус) действия прибыли, при всех прочих равных условиях, возможно за счёт повышения градиента температуры расплава между питаемым термическим узлом отливки и прибылью (утепление или обогрев прибыли) или за счёт повышения давления расплава в прибыли в период затвердевания отливки.

На рис. 3.29 представлена классификация закрытых прибылей по способам повышения эффективности их работы, в том числе применяемых в литье по выплавляемым моделям (выделены рамками с более толстыми линиями).

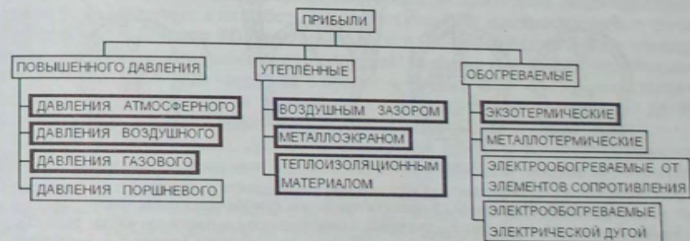


Рис. 3.29. Классификация способов повышения эффективности работы прибылей закрытого типа

Из числа способов повышения эффективности работы в литье по выплавляемым моделям наибольшее распространение получил способ, использующий атмосферное давление в прибыли. В ряде случаев в литейных цехах используют сразу несколько способов повышения эффективности работы прибылей. Например, прибыли атмосферного давления утепляют или обогревают, используя экзотермическую смесь.



**Прибли атмосферного давления.** Процесс затвердевания расплава в формельных усадочных дефектах в отливке необходимо компенсировать уменьшение объема расплава в отливке дополнительными порциями расплава из прибыли. По мере спадания расплава из прибыли в отливку сопровождается тем, что в определённый момент времени внутри полости прибыли, под слоем затвердевшего на её поверхности металла, образуется полость – усадочная раковина закрытого типа. Образующаяся полость, как правило, не сообщается с атмосферой, то в эту полость заволакует замкнутой полости остаётся ниже атмосферного. То есть образующаяся в прибыли полость заполнена разряжёнными газами, что не способствует эффективной работе прибыли.

Для повышения эффективности работы прибыли необходимо, чтобы образующаяся в ней усадочная полость (раковина) сообщалась с атмосферой. В этом случае на зеркало металла в прибыли будет воздействовать атмосферное давление, в связи с чем эффективность работы прибыли существенно возрастает.

Для сообщения внутренней полости прибыли с атмосферой используют так называемый стержень атмосферного давления. Стержень атмосферного давления можно выполнить в виде элемента тела КО. Для этого в верхней части модели прибыли делают конусообразное или щелевое углубление. После нанесения трёхслойного огнеупорного покрытия на модельный блок углубление в прибыли заподлицо заполняют жидким модельным составом. Впоследствии при нанесении огнеупорного покрытия на модельный блок с поверхности затвердевшего в углублении модельного состава постоянно удаляют огнеупорную суспензию. Разрез такой КО в области прибыльной части, после выплавки из неё модельного состава, представлен на рис. 3.30.а.

ства. В процессе нанесения огнеупорного покрытия на модельный блок, с верхнего торца стержня ножом регулярно удаляют (счищают) огнеупорную суспензию. В результате, после выплавки модельного состава, КО приобретает вид, схематично представленный на рис. 3.30.б.

На рис. 3.30.в представлен разрез КО в области закрытой прибыли, полученной в результате установки керамической вставки 5 в полость открытой прибыли. Керамическую вставку изготавливают по той же технологии, по которой в цехе изготавливают КО.

Согласно рис. 3.30.в стержень атмосферного давления является частью тела вставки. Устанавливают вставку в КО после выплавки из блока модельного состава. С целью предотвращения всплывания под действием металлостатического давления вставку после установки в прибыль по торцу закрепляют на КО самотвердеющей огнеупорной пастой 6. Самотвердеющую огнеупорную пасту готовят, например, с использованием предварительно прокалённого и измельчённого до пылевидного состояния асбеста хризотилового, жидкого стекла и кварца пылевидного. На рис. 3.30.г представлена схема двуполостной прибыли. У двуполостной прибыли подвод расплава от стояка в прибыль, при заливке КО, осуществляется через литниковый ход 10. Из литникового хода 10 расплав попадает в верхнюю полость прибыли 9, откуда через калиброванное отверстие в дросселе 8 перетекает в нижнюю полость прибыли 7, а затем попадает в отливку.

Поскольку площадь поперечного сечения калиброванного отверстия дросселя значительно меньше площади поперечного сечения литникового хода 10, то в течение времени заполнения расплавом отливки и нижней полости прибыли 7 и литникового хода, и верхняя полость прибыли оказываются полностью заполненными расплавом. То есть наличие дросселя в прибыли позволяет не только стабилизировать длительность заполнения КО расплавом, но и создать значительный температурный градиент между расплавом в прибыли и отливке за счёт разогрева КО вокруг литникового хода и верхней части прибыли в период заполнения КО (формы) расплавом.

Исследования двуполостных прибылей, проведенные автором, свидетельствуют о высокой эффективности их работы и целесообразности использования для стабилизации времени заливки КО (удельной скорости поступления расплава в отливку). Причём эффективность работы двуполостной прибыли тем выше, чем большая масса расплава проходит через неё в процессе заливки КО и чем меньше теплоёмкость дросселя. При этом не рекомендуется диаметр отверстия дросселя делать менее 0,1 диаметра наибольшей окружности, вписанной в сечение прибыли.

Стержень атмосферного давления в закрытой прибыли работает следующим образом. За время охлаждения жидкого металла в прибыли нижняя часть стержня атмосферного давления нагревается практически до температуры расплава. Поэтому на поверхности нижней части стержня, в отличие от внешней поверхности прибыли, затвердевания металла не происходит. В свою очередь, это способствует постоянному сообщению зеркала расплава в прибыли с атмосферой, которое осуществляется через капиллярные каналы материала стержня.

На рис. 3.31 представлены схемы разрезов цилиндрических отливок 1, полученных с закрытыми прибылями металлостатического 2 и атмосферного 3 давления. Из рис. 3.31.а видно, что в прибыли металлостатического давления 2 усадочная раковина представляет собой разобщённые полости (пустоты) 4, а в осевой части отливки сосредоточена рыхлота 6. Во же время отливка, полученная с прибылью атмосферного давления 3 (см. рис. 3.31.б), рыхлоты не имеет, а усадочная раковина в прибыли 3 располагается преимущественно в верхней части прибыли под стержнем атмосферного давления 5.

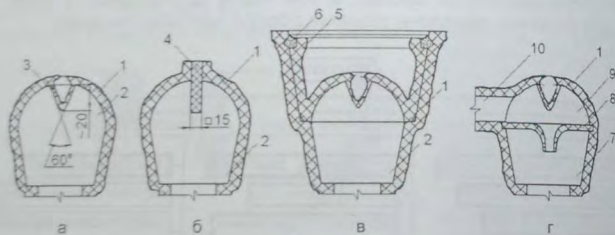


Рис. 3.30. Разрезы КО в области прибылей атмосферного давления:

- 1 – КО; 2 – полость прибыли; 3 – стержень атмосферного давления как часть тела КО;
- 4 – стержень атмосферного давления из пористого огнеупорного материала; 5 – вставка;
- 6 – твердеющая огнеупорная паста; 7 – нижняя полость двуполостной прибыли;
- 8 – дроссель (вкладыш); 9 – верхняя полость двуполостной прибыли;
- 10 – литниковый ход от стояка в двуполостную прибыль

В некоторых случаях стержень атмосферного давления выполняют из пористого газопроницаемого огнеупорного материала. В качестве такого материала может быть использован, например, пеношамотный кирпич, например, марки ШЛ-0,9, из которого вырезают стержень с размерами  $\sim(50 \times 15 \times 15)$  мм. В модель прибыли на глубину 20...30 мм стержень устанавливают после сборки модельного блока.

Перед установкой стержня в модель прибыли, на поверхность верхнего торца стержня, путём окунания в жидкий модельный состав, наносят слой модельного со-



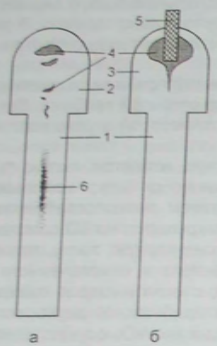


Рис. 3.31. Схемы расположения усадочных раковин и усадочной рыхлоты в цилиндрических отливках

Использование атмосферного давления в прибылях важно не только с точки зрения предупреждения образования рыхлоты в отливке, но и с точки зрения предупреждения образования в её массивных (термических) узлах воздушных раковин.

На рис. 3.32 представлены схемы разрезов отливки с прибылями, которые были получены:

- с закрытой прибылью металлостатического давления (расположение изображения на рис. 3.32,а соответствует положению отливки при заливке);

- с закрытой прибылью атмосферного давления (расположение изображения на рис. 3.32,б соответствует положению отливки при заливке).

ЛПС данной отливки обеспечивало её заполнение через боковые кольцевые прибыли 4, установленные на боковых торцевых поверхностях, а также через верхнюю прибыль 3, установленную на верхнем термическом узле. Несмотря на очевидность достаточности питания отливки и образования в верхней части верхней прибыли усадочной раковины 5, в нижней части центрального термического узла отливки, питаемого от верхней прибыли металлостатического давления 3 (см. рис. 3.32,а), периодически, наблюда-

лось появление газовых раковин 1.

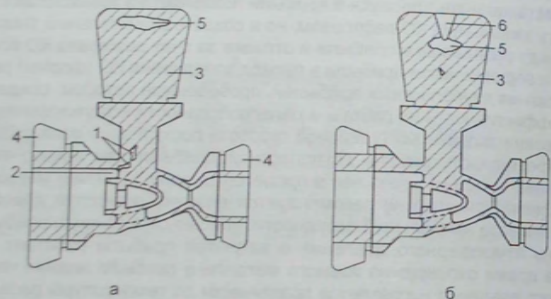


Рис. 3.32. Схема разрезов дефектной (а) и бездефектной (б) отливки с прибылями

Причиной образования этих газовых раковин явилось отсутствие воздействия на расплав в верхней прибыли атмосферного давления. Дело в том, что элемент тела КО, находящийся в полости 2 (см. рис. 3.32,а), после заполнения КО расплавом нагревался от залитого расплава до весьма высокой температуры. Поэтому к моменту образования сплошной твердой корочки затвердевшего металла на поверхности отливки и верхней прибыли 3 затвердевания расплава на торце элемента КО 2 ещё не происходило. В связи с этим, в центральном тепловом узле отливки указанный элемент КО 2 выполнял функции стержня атмосферного давления в период образования усадочной раковины в верхней прибыли отливки. То есть разрежение, создавшееся в закрытой усадочной раковине верхней прибыли, способствова-

ло "всасыванию" воздуха через поры КО элемента 2 в затвердевающий расплав верхнего термического узла отливки.

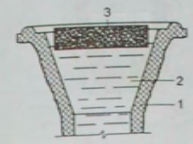


Рис. 3.33. Схема установки пеношамотной пластины в ЛВ: 1 – КО; 2 – расплав; 3 – пластина пеношамотная

После установки в верхнюю прибыль стержня атмосферного давления 6 (см. рис. 3.32,б) появление газовых раковин в отливках не наблюдалось, а усадочная раковина 5 через тело стержня атмосферного давления сообщалась с внешней средой.

Положительного влияния атмосферного давления на повышение плотности металла отливок достигают не только за счёт использования стержней атмосферного давления в прибылях. С этой целью, если сечение литникового хода, сообщающего стояк с прибылью, достаточно велико, сообщаемого стояк с прибылью, достаточно велико, непосредственно по окончании заливки КО (формы) расплавом, в ЛВ (ЛЧ) на зеркало расплава укладывают предварительно прожаренную пластину пеношамота, что схематично представлено на рис. 3.33.

Прибыли атмосферного давления также используют для отливок, затвердевающих в автоклаве в условиях высокого давления (до 6 бар) воздуха или инертного газа. В этом случае прибыли атмосферного давления можно рассматривать как прибыли воздушного давления.

**Прибыли воздушного и газового давления.** Прибыли воздушного и газового давления используют крайне редко, что связано с дополнительными затратами на их изготовление и нестабильностью работы прибылей. Схема разреза КО в области прибыли воздушного давления представлена на рис. 3.34,а, а на рис. 3.34,б представлен разрез стакана.

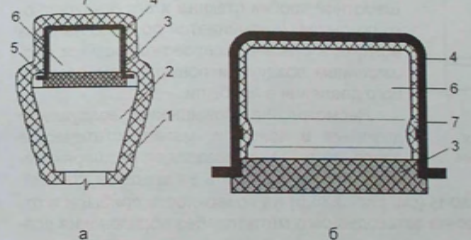


Рис. 3.34. Схема прибыли воздушного давления (а) и стакана (б)

Согласно схеме (см. рис. 3.34,а) в верхней части прибыли 2 установлен стакан 4 дном вверх. Установку стакана осуществляют на модель прибыли до начала монтажа модельного блока. Поэтому после выплавления модельного состава из блока стакан в прибыли удерживается телом КО 1.

Стакан изготавливают из стали марки 12Х18Н10ТЛ, 12Х32Н8ЮЛ и т.п. Толщина стенки стакана зависит от его диаметра и, как правило, для прибылей диаметром от 70 до 150 мм находится в пределах от 3 до 4 мм соответственно. Открытая часть стакана закрыта пеношамотной пробкой 3, а на его внутреннюю поверхность нанесен слой огнеупорного покрытия определённой толщины. В полости прибыли стакан расположен таким образом, чтобы между стенкой КО и стенкой стакана оставался зазор 5 шириной 3...5 мм.

Принцип работы прибыли воздушного давления состоит в следующем (см. рис. 3.35 и рис. 3.36).



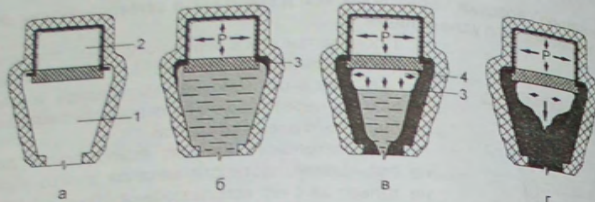


Рис. 3.35. Схема затвердевания расплава в прибыли воздушного давления:  
1 – расплав (жидкий металл); 2 – воздух; 3 – твердый металл; 4 – усадочная раковина

По окончании заполнения КО расплавом, заполненной расплавом оказывается и прибыль, что схематично представлено на рис. 3.35,а, а на рис. 3.36 данный момент времени обозначен – 0. После заполнения КО расплавом начинается процесс затвердевания металла в форме, на свободной поверхности расплава в ЛВ и зазоре 5 (см. рис. 3.34,а). В это же время проходит процесс прогрева расплава в ЛВ и зазоре 5 (см. рис. 3.34) и огнеупорного покрытия стакана 7. Описанные процессы протекают в период времени, когда величина воздушного давления в полости стакана постоянна и равна величине атмосферного давления, что видно из зависимости, представленной на рис. 3.36.

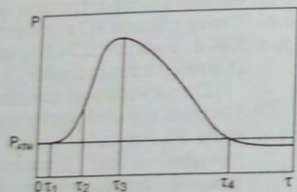


Рис. 3.36. Изменение воздушного давления в прибыли во времени

Поэтому в период времени с  $t_1$  до  $t_2$  (см. рис. 3.35,б) на поверхности прибыли и отливки продолжает нарастать корочка затвердевшего металла, без образования усадочной раковины в прибыли.

С момента времени  $t_2$  в прибыли начинает понижаться уровень расплава, поскольку давление воздуха в прибыли превышает металлостатическое давление расплава в КО, а затвердевающий металл в отливке и прибыли требует компенсации усадки непрерывными поступлениями расплава из прибыли.

В рассматриваемый момент времени воздух в прибыли ещё не нагрет до температуры металла в прибыли, поэтому расширение воздуха в прибыли продолжается и, соответственно, возрастает величина воздушного давления на поверхности расплава в прибыли. Тем не менее, в дальнейшем, по мере нагрева и расширения воздуха, в прибыли начинается активное понижение уровня ещё не затвердевшего металла 3 (см. рис. 3.35,в), что способствует определённому снижению темпа повышения воздушного давления в прибыли и образованию в ней усадочной раковины 4.

В момент времени  $t_1$  завершается процесс затвердевания расплава на зеркале в ЛВ, металла в зазоре 5 (см. рис. 3.35,б), а также завершается процесс прогрева пеношамотной пробки стакана и его огнеупорного покрытия, и начинается процесс нагрева воздуха в стакане, сопровождающийся расширением воздуха и повышением воздушного давления в прибыли.

Несмотря на повышение воздушного давления в прибыли, металлостатическое давление в КО не позволяет расширяться воздуху выходить за пределы стакана.

В момент времени  $t_3$  (см. рис. 3.36) процесс затвердевания расплава в отливке завершается и величина воздушного давления при этом должна достичь своего максимального значения.

В дальнейшем завершается процесс затвердевания расплава и в прибыли (см. рис. 3.35,г). С этого момента прибыль, а вместе с ней и воздух в прибыли, начинают охлаждаться. Соответственно, по мере охлаждения воздуха в прибыли, понижается и давление в ней. В момент времени  $t_4$  (см. рис. 3.36) давление в прибыли станет ниже атмосферного и останется таковым до окончания охлаждения залитого блока.

Вышеописанная схема работы прибыли воздушного давления реализуема в случае соблюдения достаточно большого числа условий, нарушение которых не приведёт к созданию повышенного воздушного давления в прибыли. В частности, в том случае, если нагрев воздуха в полости стакана начнётся до момента образования металла в ЛВ (ЛЧ), расширяющийся воздух либо выйдет из стакана через пеношамотную пробку и покинет полость прибыли, фильтруясь через тело КО в атмосферу, либо повысится уровень расплава в ЛВ (ЛВ). По понятным причинам, повышенного воздушного давления в прибыли создать невозможно, если начальная температура КО равна или больше температуры заливаемого сплава, либо заливка КО осуществляется в вакууме и т.п.

Начало повышения давления в прибыли (moment времени  $t_1$ ) регулируют толщиной пеношамотной пробки 3 (см. рис. 3.34) и, при необходимости, толщиной керамического покрытия на внутренней поверхности стакана. Величину воздушного давления, создаваемого в прибыли, регулируют начальной температурой КО (формы) и соотношением объёмов прибыли и воздуха в стакане.

Для вышеописанного случая объём воздуха в стакане (внутренний объём стакана) автор рекомендует рассчитывать по формуле:

$$V_0 = \frac{0,1 \cdot M_M \cdot \beta}{\rho_1} \quad (3.1)$$

где  $V_0$  – объём воздуха в стакане,  $\text{см}^3$ ;  $M_M$  – металлоёмкость КО, г;  $\beta$  – коэффициент объёмной усадки сплава при затвердевании, %;  $\rho_1$  – плотность сплава при  $20^\circ\text{C}$ ,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Величину воздушного давления в прибыли в первом приближении, в тот или иной момент времени, несложно рассчитать, используя известный закон состояния идеального газа:

$$\frac{P_{\text{атм}} \cdot V_0}{T_0} = \frac{P_t \cdot V_t}{T_t} \quad (3.2)$$

где  $P_{\text{атм}}$  – атмосферное давление (давление воздуха в стакане в момент окончания заливки КО расплавом), атм;  $V_0$  – объём воздуха в стакане,  $\text{м}^3$ ;  $T_0$  – температура воздуха в стакане в момент окончания заливки КО расплавом, К;  $P_t$  – давление воздуха в прибыли в момент времени  $t$ , атм;  $V_t$  – объём воздуха в стакане и прибыли, в момент времени  $t$ ,  $\text{м}^3$ ;  $T_t$  – температура воздуха в прибыли в момент времени  $t$ , К.

Из формулы (3.2) находим:

$$\frac{P_t}{P_{\text{атм}}} = \frac{V_0 \cdot T_t}{V_t \cdot T_0} \quad (3.3)$$



Допустив, что  $P_{атм} = 1 \text{ атм}$ ,  $V_1 = V_0 + V_{зп}$ ,  $V_2 = V_{зп}$  — объём усадочной раковины в момент времени  $\tau$ ,  $T_0 = T_2$  ( $T_2$  — температура КО в момент окончания заливки), находим, что

$$P_{\tau} = \frac{V_0 \cdot T_{\tau}}{(V_0 + V_{зп}) \cdot T_2}$$

(3.4)

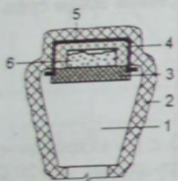
Если принять, что к моменту времени  $\tau$  величина усадочной раковины в прибыли составит  $V_{зп} = 0,1 \cdot V_0$  и воздух в прибыли прогреется до температуры  $T_{\tau} = T_L$  ( $T_L$  — температура ликвидус сплава), а при этом начальная температура КО составляла  $t_0 = 950^{\circ}\text{C}$  ( $T_2 = t_2 + 273 = 950 + 273 = 1223 \text{ К}$ ), то величина воздушного давления в прибыли, например, при  $T_{\tau} = T_L = 1,5 \cdot T_2$ , в момент времени  $\tau$ , при указанных параметрах составит:

$$P_{\tau} = \frac{V_0 \cdot T_{\tau}}{(V_0 + V_{зп}) \cdot T_2} = \frac{V_0 \cdot 1,5 \cdot T_2}{(V_0 + 0,1 \cdot V_0) \cdot T_2} = 1,36$$

$$P_{\tau} = 1,36 \text{ атм} = 0,136 \text{ МПа.}$$

С целью повышения эффективности работы прибыли воздушного давления за счёт увеличения в ней газового давления в стакан помещают определённое количество газотворного вещества (см. рис. 3.37, где обозначены: 1 — полость прибыли; 2 — газотворное вещество). В этом случае прибыль воздушного давления становится прибылью газового давления, а повышение газового давления в прибыли происходит не только в результате нагрева и расширения воздуха, заключённого во внутренней полости стакана, но и в результате выделения газа при разложении газотворного вещества. При этом величина газового давления в прибыли может достигать 4 атм и более, что достаточно опасно, учитывая относительно невысокую прочность затвердевшего металла в прибыли и крайне низкую прочность нагретой КО.

Рис. 3.37. Прибыль газового давления



В качестве газотворного вещества используют соли, имеющие температуру разложения более высокую, чем температура прокаливания КО (формы), но меньшую, чем температура нагрева стенок стакана от теплоты залитого в КО расплава. К числу таких солей, например, относится  $\text{MgSO}_4$  с температурой разложения  $t_p = 1155^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{BaCO}_3$  ( $t_p = 1030^{\circ}\text{C}$ ),  $\text{PbSO}_4$  ( $t_p = 1000^{\circ}\text{C}$ ),  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  ( $t_p = 770^{\circ}\text{C}$ ),  $\text{CaCO}_3$  ( $t_p = 500^{\circ}\text{C}$ ).

Следует отметить, что для эффективной работы прибыли газового давления необходимо:

1. Формовку КО осуществлять в монолитный опорный наполнитель.
2. Непосредственно после заливки формы "заморозить" металл в ЛВ, например, путём погружения в расплав, находящийся в ЛВ (ЛЧ), предварительно нагретого до  $200 \dots 300^{\circ}\text{C}$  стального прута.
3. Температура прокаливания формы должна быть ниже температуры разложения газотворного вещества ( $t_p < t_2$ ).
4. Температура заливаемого в форму расплава должна быть выше температуры  $t_p$  не менее чем на  $300 \dots 400^{\circ}\text{C}$ .

5. В случае выплавления модельного состава в воде или среде перегретого пара, газотворное вещество, перед помещением в полость стакана, следует герметично упаковать в полиэтиленовый пакет.

Практика применения воздушных и газовых прибылей свидетельствует, что их использование с целью повышения плотности металла в стенках отливок толщиной менее  $8 \dots 10 \text{ мм}$  нецелесообразно. Это связано с тем, что время затвердевания расплава в тонких стенках отливок значительно меньше времени начала повышения давления в прибылях ( $\tau_1$ ), которое регламентируется образованием сплошной корочки затвердевшего металла на поверхности прибыли и свободной поверхности металла в ЛВ (ЛЧ).

При отработке технологии использования газовых прибылей, прежде всего, следует рассчитать требуемое количество газотворного вещества и толщину пеншошотной пробки, во избежание, соответственно, разрушения КО в период затвердевания металла или выброса жидкого металла из КО.

**Утеплённые прибыли.** В литье по выплавляемым моделям утепление используют только для прибылей больших размеров и только в том случае, если КО заливают без опорного наполнителя. Схемы утепления прибылей представлены на рис. 3.38.

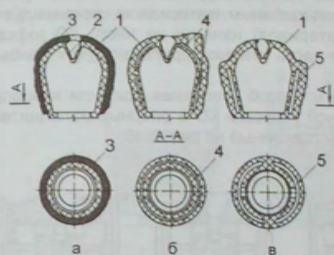


Рис. 3.38. Схемы утепления прибылей атмосферного давления: 1 — КО; 2 — стержень атмосферного давления; 3 — теплоизоляционный материал; 4 — воздушный зазор; 5 — полость в КО для металлического экрана

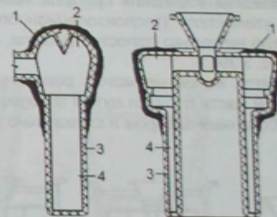


Рис. 3.39. Схемы утепления прибылей теплоизоляционным материалом: 1 — теплоизоляционный материал; 2 — прибыль; 3 — КО; 4 — рабочая полость КО

Согласно рис. 3.38 утепление прибылей осуществляют путём покрытия внешней поверхности КО прибыли теплоизоляционным материалом (см. рис. 3.38, а), выполнения воздушного зазора (см. рис. 3.38, б) или металлического экрана (см. рис. 3.38, в) в теле КО вокруг прибыли.

Для утепления прибылей в качестве теплоизоляционного материала используют хризотилловый асбест (листовой, шнуровой). Листовым асбестом или асбестовым шнуром (в два-три слоя) покрывают внешнюю поверхность КО в области прибыли после выплавления из неё модельного состава (см. рис. 3.38, а). Для закрепления асбеста на поверхности КО используют жидкое стекло, а также тонкую стальную проволоку.

Помимо хризотилового асбеста, для утепления прибылей используют вслученный перлит, вермикулит и т.п. Указанные теплоизоляционные материалы размалывают до размеров мелкой крошки ( $2 \dots 3 \text{ мм}$ ) и используют в качестве обсыпного материала поверхностей прибылей, начиная с 5-го ... 7-го слоя КО, либо по оконча-



нии нанесения на модельный блок всех слоёв КО. В последнем случае для нанесения зернистого теплоизоляционного материала на поверхность КО прибили используют жидкостекляную суспензию с пылевидным кварцем, которую наносят на поверхность прибили с помощью кисти.

Я.И. Шкленник и Л.А. Кисель для утепления прибил рекомендуют использовать воздушный зазор, выполненный в части КО, оформляющей прибель (рис. 3.38,б). Зазор выполняют путём нанесения слоя (толщина слоя 1,5...2,0 мм) модельного состава на прибель, после 4...5-го слоя огнеупорного покрытия на модельном блоке, с последующим нанесением остальных слоёв огнеупорного покрытия.

По мнению авторов, наличие воздушного зазора в КО, оформляющей прибель, уменьшает потери тепла с поверхности прибили и способствует улучшению условий питания отливки.

Роль металлических экранов, утепляющих прибель (см. рис. 3.38,в) расплав, залитый в КО. Формирование металлических экранов происходит в результате заполнения расплавом из прибили специальных технологических полостей, выполненных на расстоянии 7...10 мм от поверхности прибили, что предусматривается конструкцией модели прибили.

Для усиления эффекта последовательности затвердевания отливки, при использовании утепления прибили теплоизоляционным материалом, рекомендуется слой утеплителя (теплоизоляционного материала) нанести на часть КО, оформляющую не только полость прибили, но и часть отливки, прилегающую к прибили (см. рис. 3.39).

С этой же целью можно рекомендовать способ утепления прибили и подприбельной части отливки путём избирательной упаковки КО в опорный наполнитель, разработанный автором и схематично представленный на рис. 3.40.

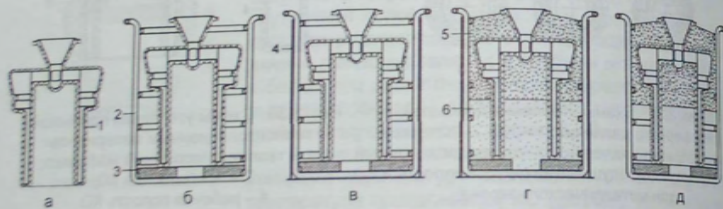


Рис. 3.40. Схема способа утепления прибил путём избирательной упаковки КО в опорный наполнитель

Согласно данному способу КО 1 (см. рис. 3.40,а) устанавливают в стальную корзину 2, на дне которой уложена стальная опорная плита 3 (см. рис. 3.40,б). Корзину с КО устанавливают в стальной, пластмассовый или деревянный короб 4 (см. рис. 3.40,в), на внутренние стенки которого предварительно нанесен тонкий слой вазелина технического, пушечной смазки и т.п. Причём короб выполнен таким образом, что расстояние между его противоположными вертикальными стенками непрерывно увеличивается в направлении от днища короба.

После установки корзины с КО в короб засыпают сухой песок 5 до уровня 2/3 высоты отливки (см. рис. 3.40,г). Оставшуюся часть внутреннего пространства короба заполняют смесью 6, например, состоящей из мелкой крошки боя КО (всученно-

го перлита, вермикулита, кварцевого песка и т.п.) и жидкого стекла. После отверждения жидкого стекла (на воздухе, в результате ввода в смесь феррохромового шлака или в результате продувки смеси углекислым газом) корзину с КО извлекают из короба. При извлечении корзины из неё высыпается песок, открывая нижнюю часть КО (см. рис. 3.40,д). При этом верхняя часть КО остаётся упакованной в затвердевшую теплоизоляционную смесь, которая удерживается как на поверхности КО, так и на прутьях корзины.

В вышеописанном состоянии в корзину КО поступает на прокаливание и заливку. До заливки, вне печи прокаливания, на воздухе нижняя часть КО охлаждается более интенсивно, чем верхняя, упакованная в теплоизоляционную смесь. Именно это обстоятельство и обеспечивает усиление эффекта последовательности затвердевания отливки.

**Обогреваемые (экзотермические) прибили.** Из числа обогреваемых прибил в литье по выплавляемым моделям используют только экзотермические прибили, расположенные в верхних частях отливки. При этом, поскольку экзотермическую смесь на поверхность прибили засыпают непосредственно после заполнения КО расплавом и для горения экзотермической смеси необходим кислород, то, по понятным причинам, экзотермические прибили применяют только при заливке КО на воздухе.

Основные этапы изготовления экзотермической прибили схематично представлены на рис. 3.41.

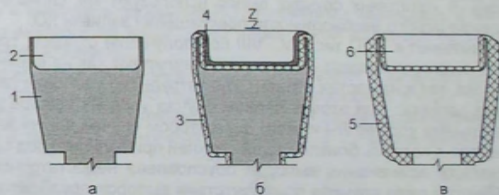


Рис. 3.41. Этапы изготовления экзотермической прибили

На рис. 3.41,а представлен разрез модели прибили 1, в верхней части которой выполнена технологическая полость 2 глубиной 20...30 мм. После нанесения на модельный блок 5...6 слоёв огнеупорного покрытия 3 поверхность огнеупорного покрытия в технологической полости прибили покрывают слоем модельного состава 4 (см. рис. 3.41,б).

В дальнейшем, при нанесении последующих слоёв огнеупорного покрытия на модельный блок, с поверхности Z (см. рис. 3.41,б) постоянно удаляют огнеупорную суспензию.

В результате, после выплавления модельного состава, КО в области прибили 5 приобретает вид, схематично представленный на рис. 3.41,в.

После заливки КО металлом, в полость прибили 6 (см. рис. 3.41,в) с помощью мерного совка засыпают экзотермическую смесь. Под действием тепла нагретой КО экзотермическая смесь воспламеняется и, сгорая, выделяет тепло. Часть выделившегося при горении тепла уходит в атмосферу, а часть поступает на нагрев КО и, соответственно, металла на прибили.

Для экзотермического обогрева прибил можно, например, использовать одну из экзотермических смесей, составы которых приведены в табл. 3.5 [12].



Составы экзотермических смесей, % (по массе)

n/n	Горючие компоненты		Окислитель	Шлакообразующие компоненты		
	алюминий	силикокальций	марганцевая руда	флюоритовый концентрат	силикатная глыба	доменный шлак
1	17	-	20	20	23	20
2	-	15	18	32	35	-

Таблица 3.5

Экзотермический обогрев прибылей можно осуществлять как для незаформованных, так и для заформованных в опорный наполнитель КО. В последнем случае торцевая часть КО, оформляющей прибель, должен быть на 10...20 мм выше уровня опорного наполнителя в опоке, а конструкция прибыли должна соответствовать конструкции, приведенной на рис. 3.30, в или рис. 3.41, в.

Существенным недостатком экзотермических прибылей является пирофорный сопровождающий горение экзотермической смеси. Кроме этого при приготовлении и применении экзотермических смесей необходимо соблюдать соответствующие требования по пожаро- и взрывобезопасности.

**Выпоры.** Основное назначение выпоров в конструкции ЛПС – обеспечение свободного выхода газов из внутренней полости КО в процессе ее заливки. То есть выпор – это канал, сообщающий внутреннюю полость КО с атмосферой. В ряде случаев выпоры используют для повышения конструкционной прочности модельного блока. В некоторых случаях выпор используют как сигнальный элемент ЛПС, предупреждающий о необходимости прекращения заливки КО.

Выпоры применяют в ЛПС типа IV...VIII при получении отливок, требующих высокой удельной скорости заливки. Выпоры устанавливают как на верхних прибылях модельного блока, так и на частях отливки, где затруднено удаление газов из полости КО во время заливки. При этом в первом случае уровень выпора должен соответствовать верхнему уровню ЛЧ или ЛВ, а во втором случае допускается осуществить вывод выпора в полость близлежащей верхней прибыли или под срез ЛЧ (ЛВ).

Необходимость применения выпоров обусловлена недостаточной газопропускаемостью КО, что в ряде случаев при отсутствии выпоров приводит к браку отливок по спаям, недоливам, окисным пленкам и пр.

Выпоры бывают прямыми (прямоходными), N - или Г-образными, щелевыми и ниточными. Конструкции выпоров, наиболее часто используемых в литье по выплавляемым моделям, представлены на рис. 3.42, где поверхность модельного блока, с которой постоянно счищают слой огнеупорного покрытия в процессе его нанесения на модельный блок, обозначена буквой (Z).

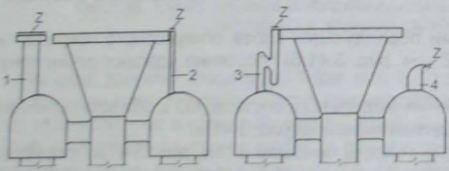


Рис. 3.42. Схемы выпоров

модельном блоке с обеих торцов, например путём припаивания модели выпора и к прибыли, и к ЛВ (ЛЧ) или керамическому упору, предварительно припаянному к торцу ЛВ (ЛЧ). Керамический упор выполняют из кусочка боя прокалённой КО, кера-

мического стержня или кубиков, вырезанных, например, из пеношамотного кирпичика. При монтаже модельного блока керамический упор припаивают к торцевой поверхности модели ЛВ (ЛЧ) и только после этого к нему припаивают выпор.

В случае, когда необходимо выполнить очень тонкий и протяжённый выпор, используют металлический стержень (например, алюминиевую спицу) диаметром 3 мм, на которую, до момента установки выпора на модельный блок, методом окуна в перегретый расплав модельного состава, наносят тонкий слой модельного состава. При этом монтаж выпора выполняют таким образом, чтобы спица могла быть удалена из КО в процессе выплавки из неё модельного состава, как это, например, схематично представлено на рис. 3.43 (на рис. 3.43 обозначены: 1 – прибель, 2 – выпор, 3 – металлический стержень выпора, 4 – литниковая чаша).

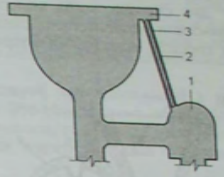


Рис. 3.43. Схема установки выпора малого диаметра с металлическим стержнем

При большом сечении (например, при диаметре выпора 20...40 мм) модель выпора 1 (см. рис. 3.42) обладает достаточно высокой прочностью, что предохраняет его от разрушения (поломки) в процессе механического удаления огнеупорной суспензии с его торца при нанесении огнеупорного покрытия на модельный блок. Недостатком прямых выпоров большого сечения является повышенный расход металла на выпор и опасность засорения КО случайными частицами, в частности, попадающими во внутреннюю полость КО через канал выпора в процессе формовки, прокаливания и заливки КО.

В некоторых случаях прямые выпоры используют в качестве технологического элемента, предупреждающего недопустимое коробление тонких протяжённых кромок отливки как в процессе охлаждения отливки после затвердевания, так и при её охлаждении в процессе термической обработки. В качестве примера на рис. 3.44, а

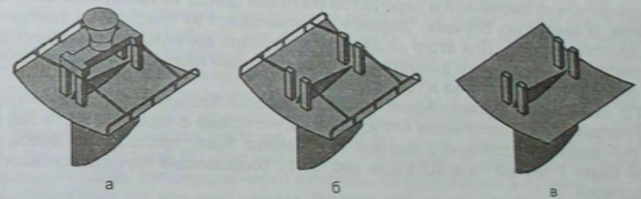


Рис. 3.44. Схемы этапов удаления элементов ЛПС с отливки

представлена отливка с ЛПС после заливки, на рис. 3.44, б та же отливка с выпорами до и после термической обработки, а на рис. 3.44, в – отливка после удаления с её поверхности выпоров.

С целью предупреждения попадания случайных частиц в полость КО применяют N-образный выпор 3 (см. рис. 3.42). Вариантом выполнения прямого выпора большого сечения является сигнальный Г-образный выпор 4 (см. рис. 3.42). Отличительной чертой этого выпора является его торцевая часть, позволяющая, после выплавки модельного состава из КО, получить на торце выпора щель с размером (1...3)х(10...30) мм. Конструкция такого выпора снижает вероятности попада-



ния случайных частиц через него в полость КО до ее заливки. Сигнальный Г-образный выпор располагают ниже уровня расположения ЛВ (ЛЧ) в случае, когда нет необходимости заполнять ЛВ (ЛЧ) металлом к окончанию заливки КО.

Для случаев, когда выполнение вышеописанных конструкций заливки КО можно или нежелательно, рекомендуется применять щелевые выпоры невозвраты, способы выполнения которых разработаны автором.

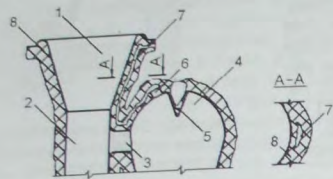


Рис. 3.45. Разрез КО со щелевым выпором: 1 – ЛВ; 2 – стояк; 3 – литниковый ход; 4 – прибыль; 5 – стержень атмосферного давления; 6 – платик; 7 – выпор; 8 – КО

поверхности КО наносят "дорожку" из модельного состава, толщиной 1...3 мм и шириной 5...15 мм.

Для изготовления "дорожки" модельный состав непрерывно наплавляют на поверхность КО, расплавляя над соответствующим местом КО твердый кусочек модельного состава на жале паяльника. Сформировать "дорожку" из модельного состава на поверхности КО также возможно путём нанесения дорожки из расплавленного модельного состава, парафина, церезина и т.п., с использованием кисточки, предварительно смоченной в перегретом расплаве одного из вышеуказанных материалов. В некоторых случаях "дорожку" изготавливают из пластичного ремонтного модельного состава. Для этого из данного материала вручную изготавливают жгут соответствующей длины и диаметром 3...5 мм, который наклеивают на поверхность КО, соединяя торец платика и торец ЛВ (ЛЧ).

По завершении формирования "дорожки" наносят последующие слои огнеупорного покрытия с обязательным его удалением, но только с торцевой части ЛВ. После выплавления модельного состава из КО выпор будет представлять собой щелевой канал 7 внутри тела КО 8 (см. рис. 3.45), сообщающий полость прибыли 4 с атмосферой.

Ниточные выпоры рекомендуются

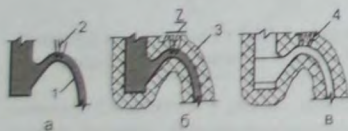


Рис. 3.46. Схема выполнения ниточного выпора: 1 – стенка модели отливки; 2 – капроновая нить; 3 – КО; 4 – ниточный выпор

Согласно разработанному способу для изготовления щелевого выпора не требуется никаких пресс-форм и приспособлений. Единственным условием изготовления щелевого выпора является наличие технологического платика 6 (см. рис. 3.45) высотой и диаметром около 10 мм в верхней части прибыли 4. Способ изготовления щелевого выпора состоит в следующем. В процессе нанесения огнеупорного покрытия на модельный блок с торцевой поверхности платика 6 (см. рис. 3.45) постоянно удаляют суспензию. После нанесения и сушки 3...5 слоёв огнеупорного покрытия от торца платика до торца покрытия

использовать в условиях единичного производства отливок, в случае недостаточной газопроницаемости КО или невозможности установки какого-либо из вышеприведенных типов выпоров.

Для выполнения ниточного выпора используют, например, жесткую капроновую нить диаметром 0,4...0,6 мм (см. рис. 3.46). Нить 2 (5...10 шт с шагом 2...5 мм) вставляют в ту часть модели отливки 1, где в отливке образуется дефект "недолив". При этом нить должна возвышаться над уровнем по-

верхности модели на 10...20 мм, что схематично представлено на рис. 3.46, а.

По окончании нанесения всех слоев КО 3 (см. рис. 3.46, б), перед выплавлением модельного состава, со стороны торцевых частей нити стачивают огнеупорное покрытие (КО), например, куском абразивного круга, до появления на поверхности КО торцов нити (на рис. 3.46, б место стачивания КО обозначено буквой Z). После выиз тела КО происходит в процессе прокалывания КО и сопровождается образованием сквозных каналов 4 (см. рис. 3.46, в) в стенке КО.

Опыт применения ниточных выпоров свидетельствует, что заливаемый в КО расплав не вытекает через каналы ниточного выпора. Это обусловлено, во-первых, высокой поверхностным натяжением жидкого металла, препятствующим губочному проникновению расплава в каналы выпора.

**Дроссели.** Как правило, ЛПС, используемые в литье по выплавляемым моделям, для получения средне- и крупногабаритных отливок, относятся к незамкнутому типу, что предопределяет практически безнапорное заполнение расплавом рабочих полостей КО. При этом заполнение КО расплавом происходит преимущественно через один или группу питателей, наиболее низко расположенных на отливке.

Поскольку при заливке всегда имеет место определённый наклон КО в ту или иную сторону относительно вертикальной оси, то при безнапорном заполнении КО происходит преимущественный перелив расплава через один или группу наиболее низко расположенных питателей и, соответственно, через одну из сторон рабочей полости КО. В свою очередь, когда начальная температура КО ниже температуры заливаемого в неё расплава, это приводит к существенному локальному разогреву КО как в области питателя, так и в области преимущественного перелива расплава в рабочей полости КО.

Формирование значительного и непредсказуемого температурного градиента по телу КО к окончанию её заливки, вызванное данным обстоятельством, провоцирует образование в затвердевающей отливке рыхлот, усадочной, и газоусадочной пористости, трещин, раковин и т.п. Причём дефекты могут образовываться как под питателем, так и в частях отливки, удалённых от питателя на значительное расстояние. В таких случаях появление того или иного дефекта, в том или ином месте отливки, носит бессистемный, случайный характер и характеризуется непредсказуемостью мест, количества и размеров образующихся дефектов от отливки к отливке.

Если рассматривать дефекты, образующиеся в теле отливки под питателем, то необходимо отметить, что возникновение вышеперечисленных дефектов, в основном, зависит от количества расплава, прошедшего через каждый конкретный питатель в процессе заливки КО (формы). То есть существует предельнодопустимое количество расплава, прошедшее через питатель, сверх которого в отливке под питателем образуется тот или иной дефект. В частности, определяя предельнодопустимое количество расплава, прошедшее через питатель цилиндрической формы, расположенный перпендикулярно к плоской стенке отливки из стали 08X14H7MЛ, автор получил следующую эмпирическую зависимость:

$$M_{P, \max} = 15,5 \cdot \frac{D^2}{\delta} \cdot [5 - 0,05 \cdot (t_1 - 1520)], \quad (3.5)$$

где  $M_{P, \max}$  – предельнодопустимое количество расплава, прошедшее через питатель в процессе заливки, кг;  $D$  – диаметр питателя, м;  $\delta$  – толщина стенки отливки в месте подвода питателя, м;  $t_1$  – средняя температура течения расплава в КО, °C.



Используя уравнение (3.5) можно рассчитать предельнодопустимое количество расплава, прошедшее через питатель в процессе заливки, ещё не приводящее к образованию в стенке отливки рыхлоты в области питателя, выявляемой методами радиационной дефектоскопии. Уравнение (3.5) было получено в результате обработки экспериментальных данных для плоских отливок с толщиной стенки от 2 до 10 мм, при соотношении  $D/\delta$  от 1 до 5 и средней температуре течения расплава в КО от 1530 до 1610°C. Отливки получали в десятислойные КО, изготовленные на основе раствора гидролизованного раствора этилсиликата с пылевидным кварцем и кварцевого песка. Начальная температура не заформованной в опорный наполнитель КО перед заливкой составляла  $960 \pm 20^\circ\text{C}$ .

Используя уравнение (3.5) несложно рассчитать, что, например, для получения отливки из стали 08X14H7МЛ, без рыхлоты под питателем, при толщине стенки отливки  $\delta=0,004$  м, диаметре поперечного сечения питателя 0,020 м и средней температуре течения расплава в КО  $1550^\circ\text{C}$ , количество расплава, прошедшее через питатель в процессе заливки не должно превышать 3,1 кг. В то же время, если использовать питатель с диаметром в поперечном сечении 0,010 м, величина предельнодопустимого количества расплава, прошедшего через питатель, составит  $M_{p, \max} = 0,775$  кг.

Влияние величины наклона КО при заливке на неравномерность поступления расплава стали в рабочую полость КО из различных питателей (литниковых ходов) одинакового поперечного сечения и длины оценим для литниковой системы, состоящей из стояка и двух горизонтальных литниковых ходов (см. рис. 3.47).

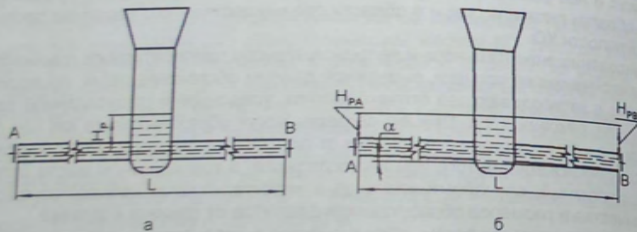


Рис. 3.47. Схемы к расчёту расходных характеристик литниковых систем

Согласно рис. 3.47 литниковые ходы расположены в нижней части стояка, в одной горизонтальной плоскости и направлены диаметрально-противоположно по отношению друг к другу.

Для расчёта примем величину площади поперечного сечения литниковых ходов А и В равными по  $4 \text{ см}^2$  или  $f_{0A} = f_{0B} = 0,0004 \text{ м}^2$ . Расстояние между точками А и В (точки А и В находятся в местах сочленения литниковых ходов-питателей с отливкой) примем равным  $L=0,3$  м.

При этом допустим, что удельная (массовая) скорость поступления расплава в стояк КО при заливке, составляет  $Q_{\text{зал}} = 4 \text{ кг/с}$ , при общей металлоёмкости рабочей полости КО  $-M_{\text{КО}}=16 \text{ кг}$ . Плотность жидкой стали примем равной  $\rho_1=7000 \text{ кг/м}^3$ .

Зависимость между высотой металлостатического напора в стояке и расходом расплава через питатели описывается известным из курса гидравлики уравнением:

$$\sqrt{H_p} = \frac{Q_{\text{зал}}}{f_0 \cdot \mu \cdot \rho_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \quad (3.6)$$

где  $f_0$  – суммарная площадь наиболее узких поперечных сечений питателей (литниковых ходов, коллекторов, стояка),  $\text{м}^2$ ,  $H_p$  – расстояние между свободной поверхностью расплава в стояке и средним уровнем расплава в сечении выходного отверстия питателя (литниковых ходов, коллекторов, стояка), м;  $Q_{\text{зал}}$  – удельная скорость поступления расплава в КО (Форму) при заливке, заполняющего КО,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\mu$  – коэффициент потерь напора в литниковой системе;  $\rho_1$  – плотность расплава,  $\text{кг/с}$ ;  $g=9,81 \text{ м/с}^2$ .

Допустим, что при заливке, литниковые ходы КО расположены строго в горизонтальной плоскости (угол наклона КО относительно вертикальной оси  $\alpha=0$  град), а величина  $\mu=0,8$ . В связи с тем, что сечения обоих питателей (литниковых ходов) находятся в одной горизонтальной плоскости (см. рис. 3.47, а), а их длины и площади поперечных сечений равны, то за время заливки КО через оба питателя пройдёт абсолютно одинаковое количество расплава – по  $16/2=8 \text{ кг}$ . В этом случае величину металлостатического напора в стояке  $H_p$  рассчитываем по преобразованному уравнению (3.6):

$$H_p = Q_{\text{зал}}^2 / \{2g \cdot [(f_{0A} + f_{0B}) \cdot \mu \cdot \rho_1]^2\} = 4^2 / \{2 \cdot 9,81 \cdot [(0,0004 + 0,0004) \cdot 0,8 \cdot 7000]^2\} = 0,0406 \text{ м}$$

Если предположить, что при заливке отклонение положения КО относительно вертикальной оси, а, соответственно, и горизонтальной плоскости, составило  $\alpha=1$  град, то выходное сечение литникового хода А (см. рис. 3.47, б) окажется выше выходного сечения литникового хода В на величину:

$$\Delta L = L \cdot \sin \alpha = 0,3 \cdot \sin 1 = 0,0052 \text{ м}$$

В этом случае, величина металлостатического напора над выходным сечением литникового хода А составит:

$$H_{pA} = H_p - 0,5 \cdot \Delta = 0,0406 - 0,5 \cdot 0,0052 = 0,038 \text{ м}$$

а для литникового хода В соответственно:

$$H_{pB} = H_p + 0,5 \cdot \Delta = 0,0406 + 0,5 \cdot 0,0052 = 0,0432 \text{ м}$$

Используя уравнение (3.6) и полученные значения  $H_{pA}$  и  $H_{pB}$ , рассчитаем удельный расход расплава через литниковые ходы А и В:

$$Q_A = f_{0A} \cdot \mu \cdot \rho_1 \cdot (2g \cdot H_{pA})^{0,5} = 0,0004 \cdot 0,8 \cdot 7000 \cdot (2 \cdot 9,81 \cdot 0,038)^{0,5} = 1,94 \text{ кг/с}$$

$$Q_B = f_{0B} \cdot \mu \cdot \rho_1 \cdot (2g \cdot H_{pB})^{0,5} = 0,0004 \cdot 0,8 \cdot 7000 \cdot (2 \cdot 9,81 \cdot 0,0432)^{0,5} = 2,06 \text{ кг/с}$$

То есть удельный расход расплава при заливке через литниковый ход А будет меньше удельного расхода расплава через литниковый ход В на величину:

$$\Delta Q = Q_B - Q_A = 2,06 - 1,94 = 0,12 \text{ кг/с}$$



Если удельная скорость поступления расплава в КО, согласно принятым данным, составляет  $Q_{\text{зал}}=4$  кг/с, а металлоёмкость рабочей полости КО —  $M_{\text{ко}}=16$  кг, то время заполнения рабочей полости КО расплавом при заливке составит:

$$\tau_{\text{ЗРП}} = M_{\text{КО}} / Q_{\text{Зал}} = 16/4 = 4 \text{ с.}$$

Следовательно, при вышеуказанных условиях, за время заливки, через литниковый ход В, расплава пройдёт больше, чем через литниковый ход А, на величину:

$$\Delta M = \Delta Q \cdot \tau_{\text{ЗРП}} = 0,12 \cdot 4 = 0,48 \text{ кг.}$$

Расчёт показывает, что разница в количестве поступающего расплава через различные питатели, расположенные в отливке на одном уровне, даже при относительно незначительном наклоне КО, при безнапорном заполнении, может достигать значительной величины. В рассмотренном случае относительная величина неравномерности поступления расплава через питатели А и В составляет (% по массе):

$$k_n = 100 \cdot \Delta M / (Q_{\text{В}} \cdot \tau_{\text{ЗРП}}) = 100 \cdot 0,48 / (2,06 \cdot 4) = 5,8\%.$$

Причём в случае, если угол наклона КО составит  $\alpha=2$  град, то  $k_n=11,6\%$ .

Причиной неравномерного поступления расплава в отливку через различные питатели, установленные на одном уровне в отливке, может быть не только непростой наклон КО на заливочный плац или в обогреваемый муфель под заливку, но и смещение питателей относительно горизонтального уровня при сборке (монтаже) модельного блока, намеренное увеличение сечения питателей, увеличение расстояния между питателями (L), снижение удельного расхода поступления расплава в КО при заливке и пр. При этом, из числа вышеперечисленных причин, наибольшее негативное влияние на равномерность поступления расплава через питатели, при безнапорном заполнении КО, оказывает низкая удельная скорость поступления расплава в КО и большая удалённость друг от друга узких сечений питателей (литниковых ходов). То есть, при всех прочих равных условиях, чем выше удельная скорость заливки КО, ближе друг к другу расположены питатели или узкие сечения в литниковых ходах, выше точность установки КО относительно вертикальной оси при заливке, выше точность установки питателей при монтаже в модельном блоке, тем стабильнее расходные характеристики ЛПС от отливки к отливке, тем более стабильно и предсказуемо качество получаемых отливок.

На практике для обеспечения равномерности заполнения рабочей полости КО расплавом через различные питатели и для перераспределения потоков расплава по каналам КО в конструкции ЛПС используют дроссель (дроссели).

На рис. 3.48 в качестве примера применения дросселей представлен модельный блок с четырьмя моделями турбинных лопаток и двумя дросселями 1, установленными на вертикальных литниковых ходах. Наличие дросселей в ЛПС, представленной на рис. 3.48,

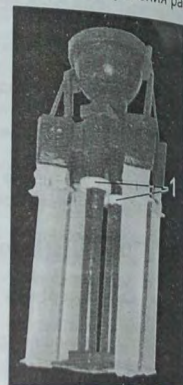


Рис. 3.48. Модельный блок турбинных лопаток с дросселями (1)

позволяет осуществлять одновременное поступление заливаемого расплава в рабочую полость КО как с нижней, так и с верхней стороны отливки. В свою очередь, образование рыхлот в турбинных лопатках.

Дроссель — элемент литниковой системы, с помощью которого регулируют как удельную скорость поступления жидкого металла в КО, так и распределяют его потоки по различным элементам ЛПС. С точки зрения гидравлики, дроссель — это препятствующее свободному движению потока жидкого металла в каналах ЛПС. ЛПС, кромки калиброванного отверстия дросселя, что, собственно, и обеспечивает стабильность и управляемость её расходными характеристиками. Следует подчеркнуть, что использование дросселей для стабилизации расходных характеристик в ЛПС с рассредоточенным подводом расплава в отливку эффективно лишь в том случае, если в ЛПС эти дроссели располагают на отливку эффективно лишь в незначительном расстоянии (L) друг от друга, либо в ЛПС используют многоканальный дроссель. При этом не следует забывать о необходимости стабилизации пространственной ориентации КО под заливку.

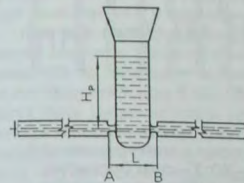


Рис. 3.49. Схема литниковой системы для оценки эффективности использования дросселей

Эффективность использования дросселя оценим на литниковой системе, схема которой представлена на рис. 3.49. Как и в предыдущем примере, в качестве критерия эффективности использования дросселя примем величину показателя  $k_n$ .

Предположим, что в результате выполнения (установки) дросселя, расстояние между выходными кромками суженных сечений в литниковых ходах составило  $L=0,06$  м, а величина  $H_p=0,1$  м (см. рис. 3.49). Исходя из того (см. условия предыдущего примера), что рабочую полость КО металлоёмкостью в 16 кг необходимо заполнить за 4 с, величина удельного расхода каждого дросселя должна составлять:

$$Q_{\text{А-В}} = M_{\text{КО}} / (2 \cdot \tau_{\text{ЗРП}}) = 16 / (2 \cdot 4) = 2 \text{ кг/с.}$$

Используя уравнение (3.6) рассчитаем площади поперечных сечений суженных участков литниковых ходов (дросселей), которые обеспечат требуемый удельный расход расплава при  $\alpha=0$  град,  $H_p=0,1$  м,  $\mu=0,8$  и  $\rho_l=7000$  кг/м<sup>3</sup>.

$$f_{0\text{А}} = f_{0\text{В}} = Q_{\text{А-В}} / [\mu \cdot \rho_l \cdot (2 \cdot g \cdot H_p)^{0,5}] = 2 / [0,8 \cdot 7000 \cdot (2 \cdot 9,81 \cdot 0,1)^{0,5}] = 2,55 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Определив величины  $f_{0\text{А}}$  и  $f_{0\text{В}}$ , несложно рассчитать, что при использовании двух одноканальных дросселей в горизонтальных литниковых ходах или одного многоканального дросселя в нижней части стояка, когда угол наклона КО относительно вертикальной оси составляет  $\alpha=1$  град, величина  $k_n$  составит 0,47%, а при  $\alpha=2$  град —  $k_n=0,84\%$ . То есть расчёт показывает, что использование дросселей в рассмотренной литниковой системе позволит снизить величину неравномерности поступления расплава в отливку (см. расчёт предыдущего примера) через различные литниковые ходы более чем в 12 раз.



Таким образом, использование нескольких одноканальных, близкорасположенных друг к другу дросселей или одного многоканального дросселя, а также обеспечение высокой точности пространственной ориентации КО при установке под заливку, являются одними из гарантов стабилизации качества литья.

Дроссели устанавливают в самых различных частях ЛПС. При этом не все дроссели одинаково способствуют повышению стабильности качества получаемых отливок.

Дроссели устанавливают (выполняют) в ЛВ или ЛЧ, что схематично представлено на рис. 3.50, в стояках, коллекторах, вертикальных литниковых ходах (см. рис. 3.50, в, рис. 3.51, рис. 3.52), горизонтальных литниковых ходах (см. рис. 3.53) или прибылях (см. рис. 3.54). При этом дроссель может быть выполнен в виде местного сужения канала, оформленного как телом самой КО (см. рис. 3.51, а, б и рис. 3.52), так и в виде предварительно изготовленной керамической вставки, которую размещают в модели ЛПС (см. рис. 3.51, в, г), или КО (см. рис. 3.50, в), после выплавления из неё модельного состава.

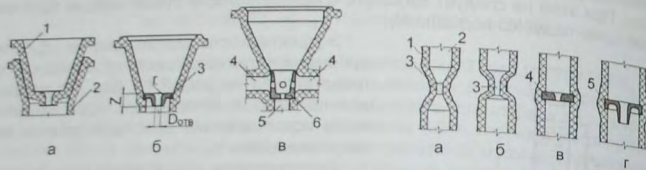


Рис. 3.50. Схема установки в ЛВ керамического стаканчика (а), одноканального (б) и многоканального дросселя (в):  
1 – керамический стаканчик; 2 – КО;  
3 – керамический одноканальный дроссель;  
4 – горизонтальный литниковый ход;  
5 – стояк; 6 – керамический многоканальный дроссель

Рис. 3.51. Схема выполнения дросселя в стояке (коллекторе):  
1 – КО; 2 – стояк (коллектор);  
3 – калиброванное отверстие дросселя; 4 – керамический дроссель с коротким каналом; 5 – керамический дроссель с протяжённым каналом

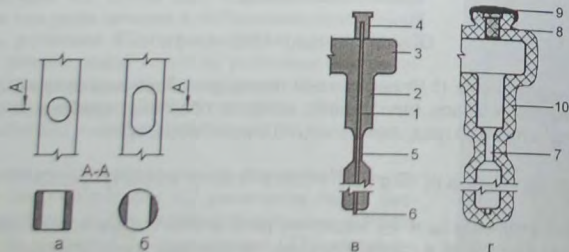


Рис. 3.52. Модели дросселей (а, б) и схема использования армирующего стержня (в, г):  
1 – тонкостенная трубка (алюминиевая, стальная) или стержень; 2 – модель коллектора; 3 – модель литникового хода; 4 – модель для выполнения полости под пробку-заглушку; 5 – модель калиброванного канала дросселя; 6 – торцевая часть трубки или стержня, заглушенная и покрытая слоем модельного состава; 7 – калиброванный канал дросселя; 8 – пробка-заглушка; 9 – самотвердеющая огнеупорная паста; 10 – КО

Керамические дроссели изготавливают непосредственно в литейном цехе, например, из стержневой керамической смеси, по технологии изготовления керамических стержней, либо из огнеупорной смеси, методом Шоу-процесса, либо методом выплавляемых моделей, по аналогии изготовления КО, и т.п. Из числа перечисленных способов изготовления дросселей, последний – наиболее экономичен, прост и доступен, поскольку не требует использования специальных материалов и оборудования.

Проектируя конструкцию дросселя (см. рис. 3.50, б) желательно предусмотреть, чтобы длина канала дросселя (Z), с калиброванным отверстием была не менее трёх диаметров калиброванного отверстия ( $D_{отв}$ ), а радиус закругления кромок во входной части отверстия –  $r \geq 0,3 D_{отв}$ . Использование дросселя с указанными параметрами калиброванного отверстия обеспечивает компактность истекающей из дросселя струи металла и предотвратит эжекцию воздуха потоком расплава.

Установка дросселя в ЛВ или ЛЧ преследует цель стабилизации удельной скорости поступления расплава в КО (Форму) в течение всего времени её заливки. Установку дросселя (см. рис. 3.50) в нижнюю часть ЛВ или ЛЧ осуществляют перед прокаливанием КО. Устанавливаемый в ЛВ 2 дроссель может иметь вид керамического стаканчика 1 с калиброванным отверстием в днище (см. рис. 3.50, а), либо дроссель выполняют в виде керамического кольца 3, опирающегося на специальный бурт, выполненный в основании ЛВ (см. рис. 3.50, б).

Как было отмечено выше, дроссель, установленный в ЛВ или ЛЧ, лишь стабилизирует величину удельного расхода жидкого металла в течение всего времени заливки КО, но не решает вопрос обеспечения перераспределения потоков расплава по литниковым ходам в КО. Поэтому дроссели, представленные на рис. 3.50, а, б, не могут быть рекомендованы для использования в ЛПС с рассредоточенным подводом расплава в отливку. Для обеспечения контролируемого рассредоточенного подвода расплава в отливку, под ЛВ или ЛЧ устанавливают многоканальный дроссель, что схематично представлено на рис. 3.50, в.

Согласно рис. 3.50, в, многоканальный дроссель 6, установлен в стояке 5, непосредственно под ЛВ, и обеспечивает рассредоточенный подвода расплава в отливку через стояк 5 и горизонтальные литниковые ходы 4.

Использование многоканальных дросселей позволяет перераспределять потоки расплава по литниковым каналам и стабилизировать режим заполнения КО. Многоканальный дроссель, по сути, является универсальным управляющим элементом ЛПС, позволяющим не только, в определённой степени, стабилизировать качество литья, но и существенно упростить процесс отработки технологии заливки КО для новых отливок за счёт оперативного подбора оптимальных площадей поперечных сечений различных каналов дросселя при неизменной конструкции ЛПС.

Помимо многоканальных дросселей, в стояке, литниковых ходах и вертикальных коллекторах выполняют одноканальные дроссели, схемы которых представлены на рис. 3.51.

Если тело дросселя оформлено стенками КО, то, во избежание поломки модельного блока в области калиброванного канала дросселя, при изготовлении модели коллектора (стояка, литникового хода) в модели выполняют сквозные калиброванные отверстия (см. рис. 3.52, а, б) либо используют армирующий металлический стержень или трубку (см. рис. 3.52, в).

Выполнение отверстий в моделях литниковых ходов (см. рис. 3.52, а, б), по сравнению с конструкциями дросселей, представленными на рис. 3.50, рис. 3.51 и рис. 3.52, г, имеет преимущество, состоящее в том, что, минуя дроссель, поток расплава продолжает двигаться вдоль стенок КО, что понижает вероятность разбрызгивания, вспенивания и окисления расплава при заливке.



В некоторых случаях дроссель устанавливается в горизонтальном протяжённом литниковом ходе, после выплавки модельного состава из КО.

Для установки дросселя 1 (см. рис. 3.53,а) на модели литникового хода 3 и 4 (см. рис. 3.53,б) выполняют местное технологическое расширение 5 ("поясок"). В процессе нанесения огнеупорного покрытия на модельный блок слой суспензии, покрывающий поверхность Z (см. рис. 3.53,б), постоянно счищают. После выплавки модельного состава (см. рис. 3.53,в) в образовавшейся полости 7 устанавливают дроссель.

Закрепляют дроссель 1 в КО 6 с помощью самотвердеющей огнеупорной прибыли 8, что схематично представлено на рис. 3.53,г (на рис. 3.53,б...г направление течения расплава в горизонтальном литниковом ходе, при заливке КО расплавом, указано стрелкой). В случае установки дросселя в горизонтальном литниковом ходе калиброванное отверстие 2 в дросселе следует выполнять в его нижней части относи-

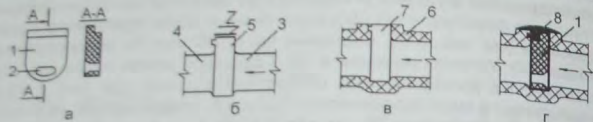


Рис. 3.53. Схема дросселя (а) и основных этапов его установки в горизонтальный литниковый ход (б...г)

тельно канала горизонтального литникового хода (см. рис. 3.53,а и рис. 3.53,г).

Аналогичным образом керамический дроссель устанавливают в прибыль, что схематично представлено на рис. 3.54.

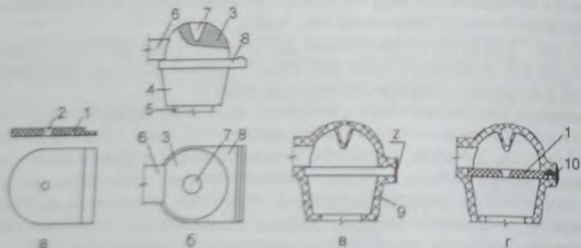


Рис. 3.54. Схема дросселя (а) и основных этапов его установки в прибыль (б...г)

Схема разреза КО в области двуполостной прибыли атмосферного давления, где роль перегородки выполняет дроссель 1 с калиброванным отверстием 2 (см. рис. 3.54,а), представлена на рис. 3.54,г. Двуполостной прибыль названа в связи с тем, что дроссель, установленный в прибыли (см. рис. 3.54,г), делит её внутреннюю полость пополам: на верхнюю и нижнюю. При этом подвод расплава в прибыль (см. рис. 3.54,б) осуществляется через литниковый ход 6 к верхней полости прибыли 3 (над дросселем).

В верхней полости прибыли выполнен стержень атмосферного давления 7, а нижняя часть прибыли 4 сообщается с отливкой через шейку прибыли 5. Для установки дросселя в полости прибыли модель прибыли выполнена с местным техноло-

гическим расширением ("пояском") 8, которое в КО 9 (см. рис. 3.54,в) формирует полость для фиксации дросселя 1. Закрепление дросселя в КО осуществляется с помощью самотвердеющей огнеупорной пасты 10.

Следует отметить, что установка дросселя в прибыли целесообразна только для прибылей относительно больших размеров. Исследования, проведенные автором на отливках из конструкционных и высоколегированных хромоникелевых сталей, свидетельствуют о том, что, если отношение теплоёмкости дросселя ( $C_{др}$ ), установленного в прибыли, к теплоёмкости расплава ( $C_{рп}$ ), находящегося в самой прибыли, не превышает 0,06...0,08, то эффективность работы двуполостной прибыли весьма высока и, в ряде случаев, превышает эффективность работы обычной (однополостной) прибыли.

Дроссели, устанавливаемые в стояках и ЛЧ, могут быть всплывающими. На рис. 3.55,а представлена схема расположения всплывающего дросселя, опирающегося, до заливки, на борт, выполненный в нижней части металлоподводящей чаше-прибыли. Согласно рис. 3.55,а дроссель 1, до заливки КО, находится в нижней части металлоприёмной чаши-прибыли 2. При этом величина зазора между боковой стенкой дросселя и вертикальной стенкой КО, над буртом в чаше-прибыли, должна составлять 2...4 мм по периметру.

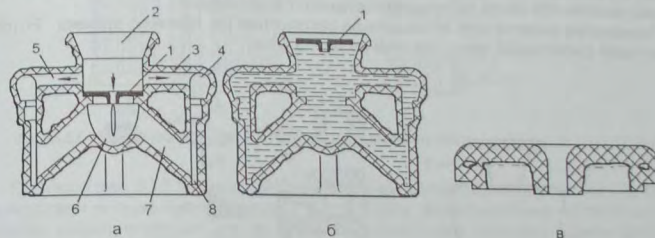


Рис. 3.55. Схема начального (а) и конечного положения всплывающего дросселя в КО (б), схема поперечного сечения всплывающего дросселя (а)

В процессе заливки расплав, заливаемый в КО 3 через ЛЧ 2, не успеет полностью пройти через отверстие в дросселе. Поэтому часть расплава (на рис. 3.55 а направление движения расплава в литниках КО обозначено стрелками) поступает по литниковым ходам 5 в верхние прибыли 4, расположенные на бандаже отливки 8.

Одновременно с этим другая часть расплава проходит через калиброванное отверстие дросселя 1, попадает в центральный термический узел отливки 6 и по полостям КО, оформляющим стойки 7, перетекает в бандаж отливки 8.

По окончании заливки КО (см. рис. 3.55,б), выполнив свою основную функцию, дроссель 1 всплывает к свободной поверхности (зеркалу) расплава в ЛЧ. Находясь на поверхности расплава, дроссель, во-первых, понижает интенсивность теплоотдачи с открытой поверхности расплава в ЛЧ, во-вторых, в процессе питания затвердевающей отливки выполняет функции стержня атмосферного давления, что также способствует улучшению условий питания отливки.

Всплывающие дроссели целесообразно изготавливать тем же методом, каким изготавливается и КО. Схема разреза всплывающего дросселя, изготовленного методом выплавляемых моделей, по аналогии с изготовлением КО, представлена на рис. 3.55,в.



**Литниковые ходы.** Литниковый ход — это канал, как правило, сообщающий литейную форму с литейной машиной или коллектором. В большинстве модельных блоков литниковые ходы, являясь частью ЛПС, выполняют несущие функции. Площадь поперечного сечения таких литниковых ходов достаточно велика и способствует снижению величины показателя выхода годного литья.

В основном, литниковые ходы имеют круглое, квадратное или прямоугольное сечение. По возможности, литниковые ходы выполняют короткими, во избежание больших тепловых и гидродинамических потерь при течении расплава по литниковой системе при заполнении КО. В местах перехода от стояка к литниковому ходу от литникового хода к прибыли выполняют галтель с относительно большим радиусом  $R=(0,2...0,5)D_{\text{лх}}$ , где  $D_{\text{лх}}$  — диаметр окружности, вписанной в сечение литникового хода. Если профиль сечения литникового хода отличен от окружности или эллипса, углы такого сечения выполняют скруглёнными, с радиусом не менее 2 мм.

**Промывники.** Промывники — это временные технологические отверстия в КО, выполненные для улучшения условий удаления модельного состава из КО при его выплавлении. Кроме того, промывники используют как водосливы при промывке внутренней полости КО горячей водой после выплавления из неё модельного состава, а также для промывки горячей водой или продувки сжатым воздухом внутренней полости КО после ее предварительного прокаливания.

Технологию выполнения промывников рассмотрим на примере отливки "Ротор", КО которой схематично представлена на рис. 3.56,а.

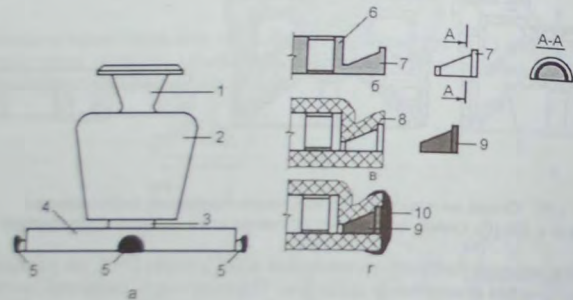


Рис. 3.56. Схема установки промывников в КО: 1 — ЛВ; 2 — верхняя прибыль; 3 — шейка прибыли; 4 — отливка; 5 — промывники; 6 — бандаж модели отливки; 7 — модель промывника; 8 — КО; 9 — керамическая пробка; 10 — самотвердеющая огнеупорная смесь

Конструктивно отливка "Ротор" представляет собой толстостенный диск (ступицу), по периметру которого выполнены короткие лопатки, охваченные кольцом (бандажом). Для выполнения промывников с внешней стороны бандажа модели отливки (см. рис. 3.56,б) припаивают модели промывников (например, 4...6 шт., равноудаленных друг от друга), имеющих форму керамических пробок, которыми промывники впоследствии будут заглушены (закрыты).

В процессе нанесения слоёв огнеупорного покрытия на модельный блок с торцевых частей моделей промывников огнеупорную суспензию удаляют ножом. По окончании выплавления модельного состава КО прокаливают, промывают горячей водой и продувают сжатым воздухом (см. рис. 3.56,в).

После очистки КО в промывники вставляют керамические пробки (см. рис. 3.56,г) и закрепляют их на КО самотвердеющей огнеупорной пастой. Керамические пробки вают при 950...980°C в течение часа.

В некоторых случаях промывники используют как технологический элемент КО для удаления из неё каких-либо вспомогательных несущих элементов модельного блока, например, стальных или алюминиевых стержней.

В качестве примера на рис. 3.57 представлена схема модельного блока, используемого для изготовления литых сварочных электродов.

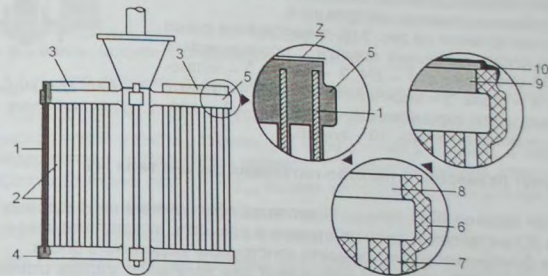


Рис. 3.57. Схема модельного блока для изготовления литых сварочных электродов

Согласно рис. 3.57 модельный блок сварочных электродов состоит из ЛВ, стояка с зумпфом и восьми горизонтальных коллекторов, расположенных попарно на двух уровнях, равноудаленных друг от друга. На коллекторах верхнего уровня выполнен технологический платик 3. Верхние коллекторы имеют сквозные отверстия диаметром 3,5 мм, выполненные с шагом 8...10 мм. Нижние коллекторы имеют аналогичные, но тупиковые отверстия, расположенные в верхней части.

Во избежание поломок моделей электродов 2 (Ø3х300 мм) во время нанесения на модельный блок огнеупорного покрытия модели электродов выполнены из дюралюминиевой проволоки 1 (спицы) диаметром 2 мм. На спицы, до монтажа модельного блока, методом окунания в перегретый расплав модельного состава нанесен слой модельного состава толщиной ~0,5 мм.

Модельный блок монтируют методом пайки, для чего подготовленные модели электродов (отливок) устанавливают между верхними и нижними коллекторами. Для установки модели электродов 2 пропускают через отверстия в верхних коллекторах 5 до упора в тупиковые отверстия нижних коллекторов 4.

После установки всех моделей электродов отверстия в верхних коллекторах заплотили с поверхностью платика запаивают модельным составом, а в местах выхода моделей электродов из верхних коллекторов и местах входа моделей в нижние коллекторы, выполняют галтели.

В процессе нанесения огнеупорного покрытия на модельный блок, нанесённый слой огнеупорной суспензии регулярно удаляют с верхней поверхности платика, обозначенной на рис. 3.57 буквой Z. В результате этого, после выплавления модельного состава, в КО 6 образуются технологические пазы 8 (промывники), через



которые вместе с модельным составом из рабочих полей электродов 7 в КО удаляют и спицы 1.

В образовавшиеся пазы на верхних коллекторах вводят керамические пробки 9, которые закрепляют на теле КО с помощью самотвердеющей огнеупорной пасты 10. По окончании твердения пасты блок подают на прокаливание и заливку сплавом.

Промывники используют преимущественно для КО, изготовленных на основе электрокорунда, при получении особо ответственных деталей, например, сопловых аппаратов, турбинных лопаток, роторов и т.п.

В качестве примера на рис. 3.58 представлена схема модельного блока турбинных лопаток с промывниками. На рис. 3.58 обозначены: 1 – ЛЧ; 2 – выпор; 3 – шлакоуловитель; 4 – стояк; 5 – верхний питатель; 6 – отливка; 7 – знаковые части керамического стержня; 8 – промывник; 9 – нижний питатель; 10 – зумпф.

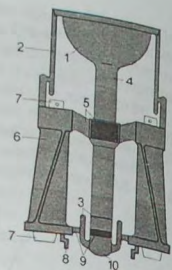


Рис. 3.58. Модельный блок турбинных лопаток

### 3.3. Расчёт размеров литниково-питающих систем типа I-III

Основной задачей ЛПС типа I...III является обеспечение необходимых условий заполнения КО металлом и питания отливок в процессе их кристаллизации, а также выполнения функции несущего элемента конструкции модельного блока.

Учитывая, что ЛПС типа I...III используют для получения мелких отливок, относящихся, как правило, к группе I или II, то выполнение условий, обеспечивающих получение отливки с качественной поверхностью и без усадочных раковин и рыхлот, не представляет особой сложности. Например, получить отливку без недоливов, сплав, корольков и т.п. можно путём повышения температуры заливки, начальной температуры КО (формы), скорости заливки металла в КО и т.д.

Для получения плотной отливки (без усадочных раковин и рыхлот) необходимо соблюдение принципа последовательного затвердевания металла смежных элементов в направлении отливка→питатель→стояк (коллектор). То есть для обеспечения достаточных условий питания затвердевающей отливки необходимо, чтобы время её затвердевания было меньшим, чем затвердевание питателя, а время затвердевания питателя, соответственно, было меньшим, чем время затвердевания стояка (коллектора).

Для оценки относительного времени затвердевания отливки (или какой-либо её части), питателя, коллектора или стояка в настоящее время широко используют значения величин приведенной толщины (модуля охлаждения) или приведенной толщины сечения указанных элементов (впервые понятие приведенной толщины, или модуля охлаждения, ввёл Н.И. Хворинин как оценку относительной продолжительности затвердевания отливок, различных по форме).

Путем сравнения величин модулей охлаждения (приведенных толщин) смежных элементов отливки или отливки и ЛПС в первом приближении оценивают последовательность затвердевания, соответственно, смежных элементов отливки или последовательность затвердевания в системе отливка→ЛПС.

Оценку последовательности затвердевания смежных элементов отливки поясним на примере отливки "Уголок", внешний вид которой представлен на рис. 3.59.

Конструктивно отливка "Уголок" состоит из элементов пластинчатой (1, 2) и цилиндрической 3 формы. Из указанных элементов отливки, определяющими, в процессе затвердевания, являются элементы под номерами 1 и 3.

Для оценки последовательности затвердевания выделенных элементов отливки рассчитывают модули их охлаждения. При этом расчёт площади поверхности каждого из указанных элементов отливки следует проводить без учёта площади поверхности сочленения этих элементов между собой.

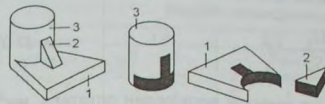


Рис. 3.59. Отливка "Уголок"

То есть в данном примере (см. рис. 3.59), где отливка расчленена на отдельные элементы, в расчёт площади поверхности выделенных элементов отливки не включают площади

их смежных, затемнённых на рис. 3.59, поверхностей.

После расчётов модуля охлаждения элемента 3 ( $R_{ц}^I$ ) и модуля охлаждения элемента 1 ( $R_{пл}^I$ ) по формуле (2.5), определяют место подвода металла в отливку.

Если  $R_{ц}^I > R_{пл}^I$ , то подвод металла (установка питателя) должен быть со стороны цилиндрической части отливки, поскольку в этом случае в отливке, в первую очередь, затвердевает её пластинчатый элемент 1, а цилиндрический элемент 3 – последним. Соответственно, при  $R_{ц}^I < R_{пл}^I$  подвод металла в форму должен быть осуществлён со стороны пластинчатого элемента отливки 1.

Для получения плотного металла в отливке, например, при  $R_{ц}^I > R_{пл}^I$ , необходимо назначить соответствующие размеры питателя и стояка, которые должны удовлетворять условию:

$$R_{ст}^I > R_{пит}^I > R_{ц}^I (R_{пл}^I), \quad (3.7)$$

где  $R_{ст}^I$  и  $R_{пит}^I$  – модули охлаждения стояка и питателя соответственно;  $R_{ц}^I$  – модуль охлаждения термического узла отливки, к которому подведен питатель.

Расчёт ЛПС типов I...III, VII (метод М.Л. Хенкина).

Согласно методу М.Л. Хенкина для расчёта ЛПС, прежде всего выбирают сечение стояка, исходя из:

- рационального размещения на нём отливок (для обеспечения наибольшего выхода годного литья);
- длины питателя (l<sub>пит</sub>) в пределах 4...12 мм (для обеспечения удобства отделения отливок от питателей);
- диаметра стояка от 25 до 56 мм.

Стояки с диаметром менее 25 мм использовать не рекомендуется в связи с их низкой прочностью. При диаметре стояка более чем 56 мм модельные блоки получают весьма громоздкими и характеризуются низким значением выхода годного литья.

Выбрав стояк, рассчитывают приведенную толщину его сечения по следующей формуле:

$$R_{ст} = \frac{S_{ст}}{P_{ст}}, \quad (3.8)$$

где  $S_{ст}$  и  $P_{ст}$  – площадь (мм<sup>2</sup>) и периметр (мм) нормального (поперечного) сечения стояка соответственно.



Для вычислений используем формулу для расчёта модуля охлаждения питателя прямоугольного сечения:

$$R_{\text{пит}}^1 = \frac{U_{\text{пит}}}{S_{\text{пит}}} = \frac{a_{\text{пит}} \cdot c_{\text{пит}} \cdot I_{\text{пит}}}{2 \cdot l_{\text{пит}} \cdot (c_{\text{пит}} + a_{\text{пит}})} = 3 \text{ мм},$$

где  $a_{\text{пит}}$  и  $c_{\text{пит}}$  – ширина и толщина питателя соответственно, мм.

Приняв  $c_{\text{пит}} = 8$  мм и подставив данное значение в вышеприведенную формулу по расчёту  $R_{\text{пит}}$ , определяем значение  $a_{\text{пит}}$ :

$$a_{\text{пит}} = \frac{2 \cdot c_{\text{пит}} \cdot R_{\text{пит}}^1}{c_{\text{пит}} - 2 \cdot R_{\text{пит}}^1} = \frac{2 \cdot 8 \cdot 3}{8 - 2 \cdot 3} = 24 \text{ мм}.$$

То есть для получения отливки "Вилка" необходимо использовать стояк диаметром 25 мм и питатель длиной  $l_{\text{пит}} = 5$  мм, с сечением  $8 \times 24$  мм. Вид стояка (прямой или конусный) и его длину (высоту), а также размещение отливок в блоке, выбирают согласно рекомендациям стандарта и техническим возможностям используемого в цехе оборудования.

**Расчет ЛПС типа I...III при использовании питателей конической формы.**

Расчет ЛПС типа I...III для мелких отливок из углеродистых сталей и медных сплавов при использовании питателей конической формы разработан автором и основывается на принципе возрастания приведенных толщин элементов автором и лении отливка → питатель → стояк (коллектор).

В процессе проектирования ЛПС данного типа существует ряд параметров, значаемых из конструктивных соображений, а именно: количество отливок в звене, длина питателей, угол конусности питателей и их форма, количество звеньев в блоке, высота стояка и размеры ЛВ, конструкция зумпфа.

К числу рассчитываемых величин предлагаемой методики относятся размеры узкого сечения питателя, при заданной величине конусности питателя, и размеры сечения стояка (коллектора). Размеры элементов ЛПС, не вошедшие в расчёт, назначают из конструктивных соображений с использованием ГОСТ 19551-74...ГОСТ 19554-74.

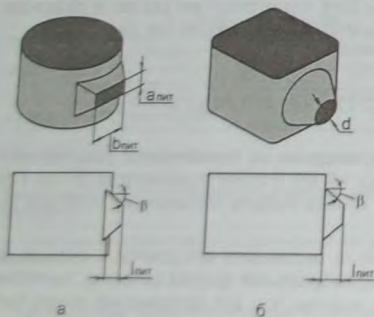


Рис. 3.61. Схемы к расчёту размеров питателей

Для проведения расчетов размеров сечений питателя и стояка (коллектора), прежде всего необходимо по чертежу отливки рассчитать модуль охлаждения её массивного (термического) узла, на котором будет установлен питатель. Следующим этапом разработки ЛПС является назначение длины и формы питателя.

В том случае, если принимается, что питатель имеет форму усеченной пирамиды, то необходимо задать его шириной (исходя из размеров массивного узла отливки), углом конусности ( $\beta$ ) и длиной ( $l_{\text{пит}}$ ). Толщину питателя ( $a_{\text{пит}}$ ) в этом слу-

чае определяют по формуле (см. рис. 3.61,а):

$$a_{\text{пит}} = \frac{2 \cdot b_{\text{пит}} \cdot R_v^1}{(b_{\text{пит}} - 2 \cdot R_v^1) \cdot \cos(\beta)} - l_{\text{пит}} \cdot \text{tg}(\beta), \quad (3.12)$$

где  $b_{\text{пит}}$  – ширина питателя в его наиболее узком месте, мм;  $R_v^1$  – модуль охлаждения массивного (термического) узла отливки, мм;  $\beta$  – угол конусности питателя, град;  $l_{\text{пит}}$  – длина питателя, мм.

Диаметр узкого сечения питателя, выполненного в виде усеченного конуса (см. рис. 3.61,б), рассчитывают по эмпирическому уравнению:

$$d = [2,1 + \cos(\beta)] \cdot R_v^1. \quad (3.13)$$

Модуль охлаждения питателя в форме усеченной пирамиды (см. рис. 3.61,б) вычисляют по формуле:

$$R_{\text{пит}}^1 = \frac{0,5 \cdot b_{\text{пит}} \cdot [a_{\text{пит}} + 2 \cdot l_{\text{пит}} \cdot \text{tg}(\beta)]}{a_{\text{пит}} + 2 \cdot l_{\text{пит}} \cdot \text{tg}(\beta) + b_{\text{пит}} \cdot \sin(\beta)}. \quad (3.14)$$

Для питателя с формой усеченного конуса модуль охлаждения вычисляют по формуле:

$$R_{\text{пит}}^1 = \frac{l_{\text{пит}} \cdot (Z^2 + 0,25 \cdot d^2 + 0,5 \cdot d \cdot Z)}{3 \cdot Z_1 \cdot Z_2}, \quad (3.15)$$

$$Z = 0,5 \cdot d + l_{\text{пит}} \cdot \text{tg}(\beta); \quad Z_1 = 0,5 \cdot d + l_{\text{пит}} \cdot \cos(\beta); \quad Z_2 = d + l_{\text{пит}} \cdot \text{tg}(\beta).$$

Диаметр стояка рассчитывают по эмпирическому уравнению:

$$D_{\text{ст}} = 5 \cdot R_{\text{пит}}^1 + 1,7 \cdot \left( \frac{n^2 \cdot M}{m} \right)^{0,25}, \quad (3.16)$$

где  $n$  – количество отливок в звене, шт;  $M$  – масса отливки, г;  $m$  – количество питателей одной отливки, шт.

Форму сечения стояка (коллектора) назначают из конструктивных соображений. В случае принятия формы сечения стояка (коллектора) отличного от круглого, рассчитанное по уравнению (3.16) значение  $D_{\text{ст}}$  приобретает смысл окружности, вписанной в сечение стояка (коллектора), что схематично представлено на рис. 3.62.

Модули охлаждения стояков (коллекторов) определяют по следующим формулам.

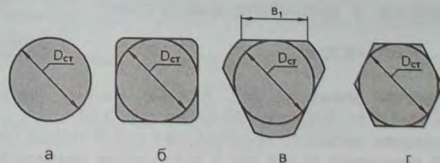


Рис. 3.62. Схемы сечений стояков



Для стояков (коллекторов) круглого, квадратного и шестигранного сечений (см. рис. 3.62, а, б, г):

$$R_{CT}^I = 0,25 \cdot D_{CT}. \quad (3.17)$$

Для стояков (коллекторов) треугольного сечения (см. рис. 3.62, в):

$$R_{CT}^I = \frac{0,5 \cdot D_{CT}}{3 \cdot D_{CT} - b_1}, \quad (3.18)$$

где  $b_1$  – ширина основания питателя, мм;

В результате проводимых расчетов принятые размеры и конфигурации элементов ЛПС должны обеспечить выполнение условия последовательности затвердевания, а именно:

$$R_V^I < R_{ПМГ}^I \leq R_{CT}^I. \quad (3.19)$$

Для обеспечения отделения отливок от стояка (коллектора) путём мывания в узком сечении питателя по его периметру или с одной стороны их лесообразно выполнить V- или U-образный пережим, что схематично представлено на рис. 3.63.

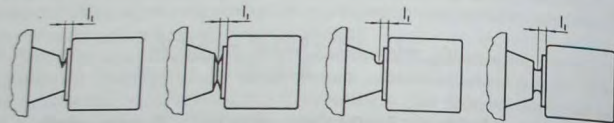


Рис. 3.63. Схема выполнения пережима на питателе

Расстояние от центра пережима на питателе до отливки ( $l_1$ ) рекомендуется рассчитывать по одному из следующих эмпирических уравнений (мм).

Для отливок из низкоуглеродистой и среднеуглеродистой стали:

$$l_1 = 0,5 + 0,065 \cdot a_{Пит}. \quad (3.20)$$

Для отливок из высокоуглеродистой и низколегированной стали, чугуна:

$$l_1 = 0,7 + 0,125 \cdot a_{Пит}. \quad (3.21)$$

Для отливок из среднелегированной и высоколегированной стали:

$$l_1 = 1,1 + 0,32 \cdot a_{Пит}. \quad (3.22)$$

**Пример 3.2.** Рассчитать параметры элементов ЛПС отливки "Колено" (материал – сталь 35Л, масса отливки  $M=110$  г), представленной на рис. 3.64.

Узел отливки, к которому подведен питатель, представляет собой полый цилиндр длиной 30 мм с внешним диаметром  $D_1=25$  мм и внутренним диаметром  $D_2=15$  мм.

Принимаем количество отливок в звене  $n=6$  шт, длину питателей  $l_{Пит}=8$  мм и ширину питателя  $b_{Пит}=10$  мм. Форма питателя – усеченная пирамида. Угол конусности питателей  $\beta=20^\circ$ . Количество питателей на одну отливку  $m=1$  шт.

Исходя из вышеприведенных данных и конструкции отливки, рассчитываем модуль охлаждения данного термического узла:

$$R_V^I = (D_1^2 - D_2^2) / [4(D_1 + D_2)] = (25^2 - 15^2) / [4(25 + 15)] = 2,5 \text{ мм}.$$

Рассчитав величину  $R_V^I$ , по уравнению (3.12) определяем толщину питателя, приняв его ширину  $b_{Пит}=10$  мм.

$$a_{Пит} = (2 \cdot 10 \cdot 2,5) / [0,94(10 - 2 \cdot 2,5)] + 8 \cdot 0,364 = 7,7 \text{ мм}.$$

Полученное значение округлим до  $a_{Пит}=8$  мм.

Зная размеры узкого сечения питателя ( $a_{Пит}=8$  мм и  $b_{Пит}=10$  мм), длину питателя ( $l_{Пит}=8$  мм) и угол его конусности ( $\beta=20^\circ$ ), рассчитываем модуль охлаждения питателя по формуле (3.14):

$$R_{ПМГ}^I = 10 \cdot (8 + 2 \cdot 8 \cdot 0,364) / [2(8 + 2 \cdot 8 \cdot 0,364 + 10 \cdot 0,342)] = 4 \text{ мм}.$$

Поскольку значение  $R_{ПМГ}^I > R_V^I$ , то следующим этапом расчёта является вычисление диаметра стояка. По формуле (3.16) рассчитываем:

$$D_{CT} = 5 + 4 + 1,7(6^2 \cdot 110)^{0,25} = 27,9 \text{ мм}.$$

Округляем значение  $D_{CT}$  до 28 мм.

Модуль охлаждения стояка круглого сечения рассчитываем по формуле (3.17):

$$R_{CT}^I = 0,25 \cdot 28 = 7 \text{ мм}.$$

В результате проведения расчётов установлено, что соотношение модулей охлаждения элементов рассматриваемой системы составило:

$$R_V^I : R_{ПМГ}^I : R_{CT}^I = 2,5 : 4 : 7,$$

что удовлетворяет требованию последовательности затвердевания (3.7).

Таким образом, в результате проведенных расчетов, получены следующие параметры ЛПС:

- стояк круглого сечения ( $D_{CT}=28$  мм);
- количество отливок в звене – 6 шт;
- количество питателей на одну отливку – 1 шт;
- форма питателя – усеченная пирамида;
- угол конусности питателя –  $20^\circ$ ;
- длина питателя – 8 мм;
- размеры узкого сечения питателя (8×10) мм;

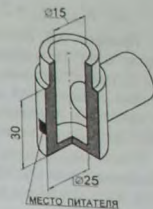


Рис. 3.64. Схема отливки "Колено"



$$- R_V^1 : R_{\text{пит}}^1 : R_{CT}^1 = 2,5 : 4 : 7.$$

**Пример 3.3.** Рассчитать параметры элементов ЛПС отливки "Шар" (материал – сталь 10X18H9Л, масса отливки – 115 г), представленной на рис. 3.65. Принимаем количество отливок в звене  $n=4$  шт при длине питателя  $l_{\text{пит}}=8$  мм. Форма питателя – усеченный конус. Угол конусности питателя  $\beta=30^\circ$ . Количество питателей одной отливки  $m=1$  шт.

Поскольку массивный узел отливки представляет собой шар диаметром  $D_1=30$  мм, то модуль охлаждения узла отливки рассчитываем по формуле:

$$R_V^1 = D_1/6 = 30/6 = 5 \text{ мм.}$$

Поскольку для отливки "Шар" принят питатель в виде усеченного конуса, то диаметр узкого сечения питателя рассчитываем по формуле (3.13):

$$d = (2,1 + 0,866) \cdot 5 = 14,8 \text{ мм.}$$

Модуль охлаждения питателя рассчитываем по формуле (3.14):

$$R_{\text{пит}}^1 = \frac{8 \left[ (14,8/2 + 8 \cdot 0,577)^2 + 14,8^2/4 + (14,8/2) \cdot (14,8/2 + 8 \cdot 0,577) \right]}{3 \cdot (14,8/2 + 8 \cdot 0,866) \cdot (14,8 + 8 \cdot 0,577)} = 2,76 \text{ мм}$$

Полученное значение  $R_{\text{пит}}^1 = 2,76$  мм меньше  $R_V^1 = 5$  мм. В связи с этим изменяем значения  $\alpha$  и  $l$  в сторону их увеличения, приняв  $\beta=45^\circ$  и  $l_{\text{пит}}=12$  мм. Повторный расчёт по формулам (3.13) и (3.14), при новых значениях угла конусности питателя и его длины, даёт значения  $d=14$  мм и  $R_{\text{пит}}^1=5,4$  мм, что удовлетворяет условию обеспечения последовательности затвердевания в системе отливка → питатель.

Приняв форму сечения стояка квадратной, по формуле (3.16) рассчитываем диаметр окружности, вписанной в его сечение:

$$D_{CT} = 5 \cdot 5 + 1,7 \cdot (4^2 \cdot 115)^{0,25} = 38,13 \text{ мм.}$$

Округляем значение  $D_{CT}$  до 38 мм.

Модуль охлаждения стояка рассчитываем по формуле (3.17):

$$R_{CT}^1 = 0,25 \cdot D_{CT} = 0,25 \cdot 38 = 9,5 \text{ мм.}$$

Соотношение модулей охлаждения элементов ЛПС составило:

$$R_V^1 : R_{\text{пит}}^1 : R_{CT}^1 = 5 : 5,4 : 9,5.$$

Таким образом, в результате проведенных расчетов получены следующие параметры ЛПС:

- стояк квадратного сечения ( $D_{CT}=38$  мм);
- количество отливок в звене – 4 шт;
- количество питателей на одну отливку – 1 шт;



Рис. 3.65. Отливка "Шар"

- форма питателя – усеченный конус;
- угол конусности питателя –  $45^\circ$ ;
- длина питателя – 12 мм;
- диаметр узкого сечения питателя – 14 мм;
- $R_V^1 : R_{\text{пит}}^1 : R_{CT}^1 = 5 : 5,4 : 9,5$ .

В том случае, если количество питателей на одну отливку более одного, а значения  $R_V^1$  для массивных узлов отливки различны – все расчеты параметров питателей необходимо проводить индивидуально, для каждого узла отливки.

Для ЛПС типа I, где ЛВ активно участвует в питании отливок, при назначении размеров ЛВ необходимо выполнить проверочный расчёт её нижнего диаметра  $d_{\text{ЛВ}}$  и высоты  $h_{\text{ЛВ}}$  [153].

$$d_{\text{ЛВ}} = 0,74 \cdot \sqrt{466 \cdot R_{CT}^1 + 0,2 \cdot (U_{CT} + U_0 \cdot N_0)} \quad (3.23)$$

$$h_{\text{ЛВ}} = 1,5 \cdot d_{\text{ЛВ}} \quad (3.24)$$

где  $R_{CT}$  и  $U_{CT}$  – приведенная толщина стояка (мм) и его объём ( $\text{мм}^3$ ) соответственно;  $U_0$  и  $N_0$  – объём единичной отливки ( $\text{мм}^3$ ) и число отливок, питаемых от стояка (шт), соответственно.

Объём ЛВ считается достаточным, если:

$$d_{\text{ЛВ}} \leq D_{CT} \quad (3.25)$$

При расчёте ЛПС типа I проверку размеров ЛВ необходимо проводить обязательно, поскольку в ряде случаев, при недостаточном объёме ЛВ, количества жидкого металла, расходуемого для питания отливок в верхней части стояка, может оказаться недостаточным и отливки на верхних уровнях блока окажутся с усадочными раковинами.

Следующим этапом расчёта ЛПС является расчёт времени заливки КО или расчёт удельной скорости поступления расплава в рабочую полость КО.

Для ЛПС типа I...III и IV при заливке углеродистой стали через стакан с калиброванным отверстием в днище (см. рис. 3.50 а, б), при уровне расплава в стакане 70 мм, длительность заливки рекомендуется [153] рассчитывать по уравнению:

$$\tau_{3\text{ЛВ}} = S_1 \cdot \sqrt[3]{\delta \cdot M_{\text{жл}}} \quad (3.26)$$

где  $M_{\text{жл}}$  – масса жидкого металла, прошедшая в форму через отверстие в стакане, кг;  $S_1$  – коэффициент пропорциональности;  $\delta$  – преобладающая толщина стенки отливки, мм.

Значения коэффициента  $S_1$  для углеродистых сталей при получении отливок в КО, изготовленных на основе гидролизованного раствора этилсиликата и кварцевого песка, по данным [153], приведены в табл. 3.11.

Значения коэффициента  $S_1$  в уравнении (3.26)

Таблица 3.11

Сплав	$S_1$
Углеродистая сталь при заливке через прибыль ( $t_{3\text{ЛВ}}=1580-1610$ °С)	2,0-2,4
Углеродистая сталь при заливке через стояк ( $t_{3\text{ЛВ}}=1580-1610$ °С)	1,58-1,72



Тип 1 – теплопровод всесторонний, условно равномерный (отвод теплоты от отливки в форму осуществляется со всех поверхностей отливки с примерно одинаковой интенсивностью).

Тип 2 – теплопровод преимущественный (большая часть теплоты от отливки в форму передается от значительного числа поверхностей отливки).

Тип 3 – теплопровод направленный (теплоотвод в форму осуществляется преимущественно только от одной из поверхностей отливки).

Влияние типа теплоотода от затвердевающей отливки на характер, величину и место расположения усадочных дефектов в ней рассмотрим на примере цилиндрической отливки. В этом случае примером теплоотода типа 1 может служить теплоотвод от затвердевающей отливки в однородной (по теплофизическим параметрам к моменту начала кристаллизации металла) форме с неуправляемой температурой. В этом случае усадка расплава в форме проходит с образованием в отливке усадочных дефектов, схематично представленных на рис. 3.66, где стрелками обозначено направление наиболее интенсивного теплоотода от поверхности отливки.

Величина усадочных дефектов в отливке, в рассматриваемом случае, достигает, для различных сплавов 3,5...9,5% (по объёму).

Поскольку для большинства отливок наличие значительных усадочных пустот недопустимо, то в этих случаях при затвердевании отливок создают условия для преимущественного и направленного теплоотода от залитого в форму расплава.

Способ преимущественного теплоотода от затвердевающей отливки реализован в большинстве видов литья, использующих однородные (по теплофизическим показателям) формы с неуправляемой, в процессе затвердевания отливки, температурой. Преимущественности интенсивности теплоотода от отливки в этом случае достигают за счёт того, что на одну из поверхностей отливки устанавливают прибыль – питающий отливку элемент, в котором расплав затвердевает позже, чем в отливке, и который, по сути, является удаляемой частью отливки.

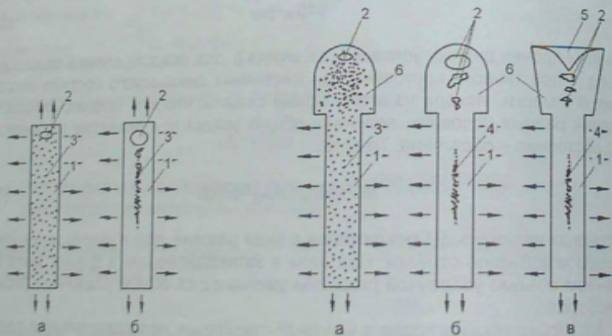


Рис. 3.66. Схемы расположения усадочных дефектов в отливках, затвердевших в условиях всестороннего, равномерного теплоотода от отливки: 1 – отливка; 2 – усадочная раковина закрытого типа; 3 – пористость

В связи с тем, что усадочная раковина образуется в той части отливки, которая затвердевает последней и не имеет компенсации усадки дополнительным объемом расплава извне, то, по окончании затвердевания расплава, в прибыли образуется усадочная раковина, а в отливке – усадочная пористость, что схематично представлено на рис. 3.67.

Именно по этой причине при получении отливок в однородной форме с неуправляемой температурой прибыли выполняют с большим модулем охлаждения, чем у отливки или её термического узла, на котором установлена прибыль. То есть использование прибыли с модулем охлаждения большим, чем у отливки или её термического узла, обеспечивает последовательность затвердевания отливки в направлении отливка – прибыль.

С целью уменьшения объёма прибыли (повышения выхода годного) и величины пористости отливки, за счёт повышения градиента температуры расплава по высоте затвердевающей отливки, прибылям придают компактную форму, обогревают и утепляют их и т.п.

Все вышеперечисленные мероприятия повышения эффективности работы прибыли позволяют получить отливку без усадочной раковины. Тем не менее в теле отливки всегда присутствует усадочная пористость, величина которой может достигать значений 2,5...3,5% и явиться браковочным признаком отливки. В этих случаях, при получении отливок, используют различные технологические приёмы, направленные на понижение величины усадочной пористости отливок.

В частности, с этой целью используют третий тип теплоотода от отливки – направленный. Реализация процесса затвердевания отливок с направленным теплоотводом (направленной кристаллизацией сплава) позволяет получать отливки с величиной пористости менее 0,3...0,5%. В условиях серийного производства литья для реализации данной схемы затвердевания отливки используют установки направленной кристаллизации. При получении отливок в этих установках начальную температуру КО (формы) повышают до температуры заливки расплава, а преимущественный теплоотвод от расплава осуществляют только со стороны донной части КО. Такой способ теплоотода от затвердевающей отливки позволяет достичь значительного градиента температуры между расплавом в вышележащей части КО и затвердевшим металлом в нижележащей части КО, что позволяет получать отливки не только с низкой величиной усадочной пористости, но и практически без прибыльной части, что схематично представлено на рис. 3.68 (на рис. 3.68 обозначены: 1 – отливка; 2 – пористость; 3 – усадочная раковина открытого типа; 4 – прибыль).

Как было отмечено выше, ЛПС, используемые в литье по выплавляемым моделям, помимо обеспечения заполнения формы жидким металлом и питания отливок при кристаллизации, выполняют функцию несущего элемента конструкции модельного блока. По этой причине относительно невысокая прочность используемых модельных составов практически всегда вынуждает выполнять литниковые ходы ЛПС с весьма большими сечениями и габаритами, что приводит к снижению выхода годного и активному участию литниковых ходов, стояков и ЛВ (ЛЧ) в питании отливки.

Несмотря на это, прибыли, используемые в литье по выплавляемым моделям, должны отвечать следующим

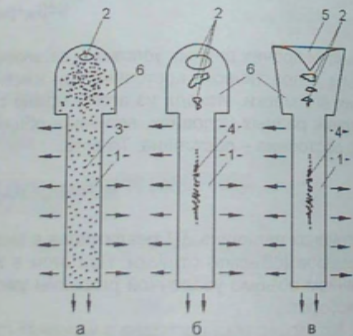


Рис. 3.67. Схемы расположения усадочных дефектов в отливках, затвердевших в условиях преимущественного теплоотода от отливки: 1 – отливка; 2 – усадочная раковина закрытого типа; 3 – пористость распродоточенная; 4 – пористость сосредоточенная; 5 – усадочная раковина открытого типа; 6 – прибыль

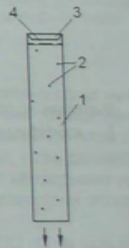


Рис. 3.68. Схема расположения усадочных дефектов в отливке, затвердевшей в условиях направленного теплоотода



Значения коэффициента  $\gamma$  в уравнении (3.33)

Охлаждаемое тело	$R_{\gamma} (R_{\gamma}')^2$	$\gamma$
Плита толщиной $a$	$a/4$	1,54
Брус прямоугольного сечения $a \times a \times 4a$	$a/2,5$	1,42
Брус квадратного сечения $a \times a \times a$	$a^2/4$	1,27
Цилиндр диаметром $d$ (при $l > 8d$ )	$d/4$	1,00
Шар диаметром $d$	$d^2/6$	0,75
Цилиндрическая прибыль высотой $h_n = 1,25d_n$	$d_n/4,4$	0,95

требованиям:  
 - прибыль должна затвердевать позже термического узла или стенки отливки, на которой она установлена;  
 - уровень расплава в прибыли должен быть выше уровня расплава в отливке или её части, питаемой от данной прибыли;  
 - запас жидкого металла в прибыли, а также запас жидкого металла, поступающего через прибыль, должен быть достаточным для питания отливки или её части, питаемой от данной прибыли;  
 - в период затвердевания отливки зеркало жидкого металла в прибыли и стояке должно сообщаться с атмосферой;  
 - форма прибыли должна быть компактной и технологичной;  
 - расположение прибыли в блоке должно обеспечить удобство монтажа модельного блока и отделения прибыли от отливки;  
 - масса прибыли должна быть минимальной.

Исходя из этих требований, для отливок, получаемых методом литья по выплавляемым моделям, разработан ряд методов расчёта размеров прибылей.

**Комплексный метод.** Для расчёта объёма прибыли (в  $\text{см}^3$ ), имеющей форму усечённого конуса, Я.И. Шленник предложил следующую формулу:

$$U_{\text{п}} = m \xi (1 + \beta)^2 y z (R_{\gamma}')^3 + 3 \beta U_{\text{о}}, \quad (3.33)$$

где  $\beta$  – объёмная усадка металла отливки при кристаллизации;  $z$  – коэффициент теплового состояния прибыли (для неутеплённых прибылей принимают  $z=1$ , для утеплённых –  $z=0,65$ );  $U_{\text{о}}$  – объём расплава в форме, питаемой от данной прибыли,  $\text{см}^3$ .

$$U_{\text{о}} = U_{\text{о}} (1 + \beta), \quad (3.34)$$

где  $U_{\text{о}}$  – объём отливки, питаемой от данной прибыли,  $\text{см}^3$ .

Значение  $m$ , в формуле (3.33) зависит от расстояния ( $L$ ) между питателями, установленными на отливке, и шейкой прибыли, выраженного в толщинах тела отливки.

$L \dots$	2	2-5	5-10	10-20	20-30	30-40
$m \dots$	1,0	1,03	1,05	1,10	1,15	1,2

В случае подвода металла в прибыль, значение  $m=0,9$ .

$\xi$  – коэффициент конфигурации прибыли.

$$\xi = \frac{S_{\text{п}}^3}{U_{\text{п}}^2}, \quad (3.35)$$

где  $S_{\text{п}}$  и  $U_{\text{п}}$  – охлаждаемая поверхность и объём прибыли, соответственно (для цилиндрической прибыли с основанием диаметром  $d_n=1$  и высотой  $h_n=1,25d_n$ , коэффициент конфигурации прибыли  $\xi=108$ ).

$\gamma$  – коэффициент конфигурации прибыли и термического узла отливки, на которой установлена прибыль.

Значение  $\gamma$  в формуле 3.33 для отливок с одинаковой приведенной толщиной выбирают по табл. 3.14, составленной Я.И. Шленником и Л.А. Киселёв.

**Пример 3.4.** Рассчитаем объём прибыли комплексным методом для отливки, блок которой представлен на рис. 3.69, при следующих исходных данных: материал отливки – сталь марки 10X18H9Л,  $\beta=0,058$ ,  $U_{\text{о}}=123 \text{ см}^3$ ,  $(R_{\gamma}')^3=0,93 \text{ см}$ ,  $\xi=108$ . Для питания отливки используем прибыль цилиндрической формы без утепления.

Для расчёта по формуле (3.33) принимаем следующие значения. Поскольку утепления прибыли нет, то принимаем  $z=1$ . Поскольку, согласно рис. 3.69, заполнение расплавом рабочей полости КО (отливки) осуществляется через прибыль, то принимаем значение  $m=0,9$ . Величину  $\gamma$  в уравнении (3.33) принимаем равной 0,95, поскольку для питания данной отливки будем использовать цилиндрическую прибыль с соотношением её высоты к диаметру, равным 1,25 (см. табл. 3.14).

Принятые значения величин подставляем в формулу (3.33) и решаем её относительно  $U_{\text{п}}$ .

$$U_{\text{п}} = m \xi (1 + \beta)^2 y z (R_{\gamma}')^3 + 3 \beta U_{\text{о}} = \\ = 0,9 \cdot 108 \cdot (1 + 0,058)^2 \cdot 0,95 \cdot 1 \cdot (0,93)^3 + 3 \cdot 0,058 \cdot 123 = 104,5 \text{ см}^3.$$

Принимаем величину объёма цилиндрической прибыли равной  $U_{\text{п}}=105 \text{ см}^3$ .

**Метод вписанных сфер.** Основным допущением метода вписанных сфер является предположение о том, что диаметр сферы, вписанной в сечение тела отливки, эквивалентен длительности затвердевания данного сечения отливки. При этом последовательность затвердевания отливки считают соблюденной, если диаметры последовательно вписанных сфер в сечение тела (стенки) отливки непрерывно увеличиваются от торцевой части отливки к прибыли или другому питающему отливку элементу ЛПС.

Применительно к литью по выплавляемым моделям расчёт ЛПС по методу вписанных сфер разработал Н.Н. Лященко на основе результатов экспериментальных исследований и обобщения производственного опыта.

Для расчётов размеров ЛПС типа I по методу вписанных сфер используют данные табл. 3.15, а для расчётов размеров ЛПС типа II, V... VIII используют данные табл. 3.16 и табл. 3.17, а также рис. 3.70.

В последнем случае для расчёта прибыли используют формулы, относящиеся к верхнему термическому узлу отливки, для расчёта горизонтального литникового хода – к нижнему термическому узлу отливки.

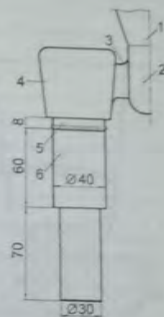


Рис. 3.69. Схема к расчёту объёма прибыли  
 1 – литник; 2 – стояк;  
 3 – литниковый ход;  
 4 – прибыль; 5 – шейка прибыли; 6 – отливка



Таблица 3.15  
**Формулы для расчёта ЛПС типа I по методу вписанных сфер**

Конструктивный элемент	Характерный размер	Расчётные формулы узла	
		компактного	протяжённого
Отливка	Диаметр сферы, вписанной в узел $D_v$	Определяют по чертежу отливки	
	Толщина $a_{лит}$	$a_{лит} = (1,0-1,2) D_v$	
Питатель	Ширина $b_{лит}$	$b_{лит} = a_{лит}$	$b_{лит} = (3-4) D_v$
	Длина $l_{лит}$	$l_{лит} = 6-8 \text{ мм}$	
Стояк	Диаметр или ширина $a_c$	Определяют по раскладке отливок, но не менее $a_c > 3 d_{лит}$	

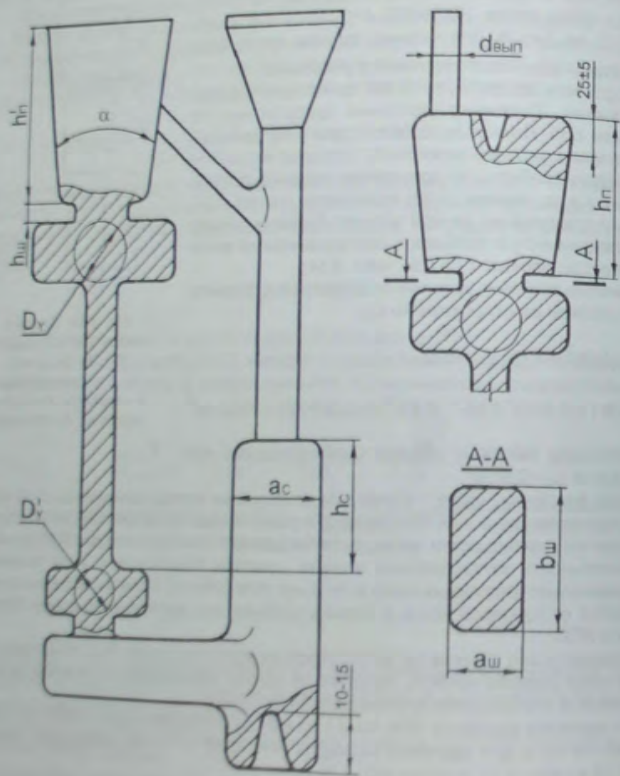


Рис. 3.70. Схема и расчёт размеров элементов ЛПС типа V...VIII

Таблица 3.16  
**Формулы для расчёта прибылей в ЛПС типа V...VIII и горизонтального литникового хода в ЛПС типа II и VII по методу вписанных сфер**

Конструктивный элемент	Характерный размер	Расчётные формулы для узла	
		компактного	протяжённого
Отливка	Диаметр сферы, вписанной в узел $D_v$	определяют по чертежу отливки	
Шейка прибыли	Толщина (диаметр)	$a_ш = (1,0-1,2) D_v$	
	Ширина	$b_ш = a_ш$	$b_ш = (3...4) D_v$
	Высота	$h_ш = (0,4-0,5) D_v$	
Прибыль	Толщина нижнего основания	$a_n = k_1 D_v$	
	Ширина нижнего основания	$b_n = a_n$	$b_n = b_ш + (k_1 - 1) D_v$
	Угол при вершине конуса	$\alpha = 10^\circ - 15^\circ$	
	Высота прибыли: закрытого типа	$h_n = (2,5-3,0) D_v$	
	открытого типа	$h'_n = (3,0-3,5) D_v$	
	Радиус действия прибыли	$r_d = k_2 D_v$	
Выпор	Диаметр	$d_{вып} = (0,2-0,3) a'_{ш}$	
	Диаметр сферы, вписанной в нижний узел ( $D'_v$ )	определяется по чертежу отливки	
Питатель	Толщина (диаметр)	$a_{лит} = (1,0-1,2) D'_v$	
	Ширина	$b_{лит} = a_{лит}$	$b_{лит} = (3-4) D'_v$
	Длина	$l_{лит} = 6-8 \text{ мм}$	
Горизонтальный литниковый ход	Ширина сечения	$b_x = k_1 D'_v$	
	Высота сечения	$h_x = b_x$	
Стояк	Ширина (диаметр)	$a_c > k_3 b_x$	

Примечание. Значение коэффициентов  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_3$  приведены в табл. 3.17.

Таблица 3.17

Коэффициент	Значения коэффициентов для стали		
	углеродистой	среднелегированной	высоколегированной
$k_1$	1,4	1,6	1,8
$k_2$	1,2	1,25	1,3
$k_3$	5	4	2,5



**Пример 3.5.** Методом вписанных сфер рассчитаем размеры и, исходя из этого, определим объем неутепленной прибыли закрытого типа для отливки, модельный блок которой представлен на рис. 3.71. Материал отливки – сталь марки 10X18H9Л.

1. Расчет шейки прибыли. Согласно схеме, представленной на рис. 3.71, диаметр сферы (окружности), вписанной в её компактный термический узел отливки  $D_y = 40$  мм. В этом случае высота шейки прибыли составит:

$$b_{ш} = (0,4 \dots 0,5) D_y = (0,4 \dots 0,5) 40 = 16 \dots 20 \text{ мм}$$

Принимаем  $b_{ш} = 16$  мм. Поскольку горизонтальное сечение термического узла отливки представляет собой окружность, то, принимаем шейку диаметром  $D_{ш} = b_{ш} = a_{ш} = D_y = 40$  мм.

2. Расчет прибыли. Поскольку, в поставленном условии принята прибыль закрытого типа, то её высота составит:

$$h_{п} = (2,5 \dots 3,0) D_y = (2,5 \dots 3,0) 40 = 100 \dots 120 \text{ мм}$$

Принимаем  $h_{п} = 100$  мм. Диаметр нижнего основания прибыли рассчитываем по уравнению:

$$D_{п} = a_{п} = k_{п} D_y = 1,8 \cdot 40 = 72 \text{ мм}$$

Поскольку рассматриваемая отливка имеет один термический узел, то, соответственно, на данную отливку устанавливаем одну прибыль.

Все остальные неуказанные размеры прибыли определяем по её графическому построению, приняв угол при вершине конуса прибыли  $\alpha = 15^\circ$ . По данным, полученным в результате графического построения прибыли (см. рис. 3.71), проводим расчёт её объема. Для данной прибыли объем составил  $650 \text{ см}^3$ .

Следует отметить, что в ОСТ 4Г 0,054.305-84, где расчёт размеров прибыли рекомендуется осуществлять по данному методу, предложены следующие соотношения размеров прибылей.

Для прибыли открытого типа, выполненной в виде усеченного конуса и установленной на термический узел отливки с приведенной толщиной  $R_1^1$  и объемом отливки  $U_0$ , диаметр нижнего основания прибыли рассчитывают по уравнению (см):

$$D_{п} = 0,8 \cdot \sqrt{450 \cdot R_1^1 + 0,25 \cdot U_0};$$

- диаметр верхнего основания прибыли:

$$D_{к} = 1,25 \cdot D_{п};$$

- высоту прибыли:

$$h_{п} = 2 \cdot D_{п}$$

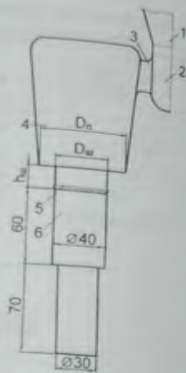


Рис. 3.71. Схема к расчёту объема прибыли:

- 1 – ЛВ; 2 – стояк;
- 3 – литниковый ход;
- 4 – прибыль;
- 5 – шейка прибыли;
- 6 – отливка

Для прибыли закрытого типа диаметр нижнего основания прибыли рассчитывается по уравнению:

$$D_{п} = \sqrt{170 \cdot R_1^1 + 0,25 \cdot U_0};$$

- диаметр верхнего основания прибыли:

$$D_{к} = 1,2 \cdot D_{п};$$

- высоту прибыли:

$$h_{п}^1 = 1,25 \cdot D_{п}$$

Если ЛПС, используемые в литье по выплавляемым моделям, рассматривать с точки зрения последовательности затвердевания её элементов, то схемы питания отливок, реализуемые в ЛПС, можно представить в виде определённых соотношений модулей охлаждения (приведенных толщин) этих элементов. Возможные варианты таких соотношений приведены в табл. 3.18 [239].

Соотношения модулей охлаждения (приведенных толщин) элементов ЛПС

Таблица 3.18

Индекс схемы питания	Схемы соотношения элементов*	
	A	$R_y^1 < R_{п}^1 \leq R_{лх}^1 \leq R_{ст}^1$
B	$R_y^1 < R_{п}^1 \leq R_{ст}^1$	$(R_y < R_{п} \leq R_{ст})$
C	$R_y^1 < R_{шт}^1 \leq R_{ст}^1$	$(R_y < R_{шт} \leq R_{ст})$
D	$R_y^1 < R_{п}^1$	$(R_y < R_{п})$
E	$R_y^1 < R_{ст}^1$	$(R_y < R_{ст})$
F	$R_y^1 < R_{п}^1 > R_{лх}^1 \leq R_{ст}^1$	$(R_y < R_{п} > R_{лх} \leq R_{ст})$
K	$R_y^1 < R_{п}^1 > R_{ст}^1$	$(R_y < R_{п} > R_{ст})$

Примечание. \* – величина  $R^1(R)$  является модулем охлаждения (приведенной толщиной): термического узла отливки –  $R_y^1$  ( $R_y$ ), прибыли –  $R_{п}^1$  ( $R_{п}$ ), питателя –  $R_{шт}^1$  ( $R_{шт}$ ), литникового хода –  $R_{лх}^1$  ( $R_{лх}$ ) и стояка –  $R_{ст}^1$  ( $R_{ст}$ ).

В соответствии со схемой питания под индексом А (см. табл. 3.18), ЛПС используют для получения крупногабаритных отливок с массивными термическими узлами. Как правило, эти ЛПС получаются громоздкими и характеризуются низким выходом годного.

Схемы В–Е являются частными случаями общей схемы А. ЛПС, имеющие эти схемы питания, ориентированы на упрощение конструкции ЛПС и повышение технологичности модельного блока, повышение выхода годного.

Схему С реализуют при получении мелких отливок, например при звеньевой сборке моделей в блоки, где роль прибыли выполняет стояк.

Схему D наиболее часто используют при проектировании ЛПС для отливок с одним термическим узлом. Примером схемы D могут служить ЛПС, используемые для



отливки роторного типа, где массивная прибыль выполняет функции стояка и располагается над отливкой, а ЛВ или ЛЧ расположена в верхней части прибыли.

Схемы В, Е, F и К используют при проектировании ЛПС для крупно- и среднебаритных тонкостенных фасонных отливок корпусного типа, турбинных лопаток и т.п. При этом в одной ЛПС для питания различных термических узлов могут быть реализованы несколько схем питания (смешанная схема).

Из приведенных схем питания отливок "узкие" звенья в цепи питания имеют схемы F и К, где подпитка прибылей жидким металлом, при затвердевании отливки, прекращается в результате затвердевания расплава в литниковом ходе (схема F) или стояке (схема К). В связи с этим, если в схемах А - Е расчёт элементов ЛПС сводится к элементарному вычислению их сечений через показатели приведенных толщин (модулей охлаждения), обеспечивающих последовательность затвердевания от отливки к стояку, то в схемах F и К для достижения максимально возможного выхода годного следует решать задачу по минимизации размеров прибыли.

Дело в том, что, как было отмечено выше, в литье по выплавляемым моделям ЛПС, помимо всего прочего, выполняют ещё и функцию несущего элемента конструкции модельного блока. В связи с этим, как правило, все элементы литниковой системы имеют завышенные площади сечений. В свою очередь это приводит к участию элементов литниковой системы в питании затвердевающей отливки. То есть, рассматривая прибыль не как обособленный питающий элемент ЛПС, а учитывая поступление жидкого металла из литникового хода (схема F) или стояка (схема К) в прибыль, в процессе затвердевания отливки, можно провести минимизацию размеров прибыли.

Если рассматривать систему отливка→прибыль→литниковый ход→стояк, то минимальнодопустимый объём прибыли можно рассчитать по формуле [239]:

$$U_{л.мин} = \frac{(1 - \psi_0) \cdot U_0}{1 + \frac{\psi_y}{A} - \psi_0} \quad (3.36)$$

$$A = \frac{1}{1 - 3 \cdot \beta}; \quad \psi_y = \left( \frac{R_{ЛХ}^1}{R_0^1} \right)^2; \quad \psi_0 = \left( \frac{R_{ЛХ}^1}{R_0^1} \right)^2$$

где  $\psi_0$ ,  $\psi_y$  - доля затвердевшего расплава в отливке и её термическом узле за время затвердевания расплава в литниковом ходе соответственно;  $R_{ЛХ}^1, R_0^1, R_y^1$  - модуль охлаждения литникового хода, отливки и её термического узла, соответственно;  $\beta$  - коэффициент объёмной усадки сплава отливки при затвердевании,  $U_0$  - объём отливки.

Анализ уравнения (3.36) показывает, что при отсутствии подпитки металлом отливки и прибыли из литникового хода ( $\psi_0 = \psi_y = 0$ ) отношение  $\frac{U_{л.}}{U_0} = 1$ , то есть объём

прибыли становится равным объёму питаемой части отливки. В том случае, если  $R_0 = R_{ЛХ}$ , то объём прибыли равен нулю, а схемы питания отливок F и К превращаются соответственно в схемы С и Е (см. табл. 3.18).

То есть, используя уравнение (3.36), рассчитывают минимально-допустимый объём прибыли с учётом её подпитки жидким металлом от стояка через литниковый

ход. В этом случае размеры прибылей и их модуль охлаждения можно рассчитать по формулам, приведенным в табл. 3.19 и табл. 3.20.

Таблица 3.19  
Формулы для расчёта минимально-допустимых размеров местных прибылей

Формы прибылей и формулы для расчёта их размеров	Схемы прибылей
<p><b>1. Обратный, усечённый конус:</b></p> $\alpha = 5^\circ - 10^\circ; \quad D_H = (1,15 - 1,25) \cdot D_{ш};$ $r_1 = (0,1 - 0,2) \cdot D_B; \quad D_B = \sqrt[3]{D_H^3 + 7,643 \cdot U_{л.} \cdot \text{tg}(\alpha)};$ $h = \frac{D_B - D_H}{2 \cdot \text{tg}(\alpha)};$ <p>модуль охлаждения прибыли:</p> $R_H^1 = \frac{1,274 \cdot U_{л.}}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 - S_{ЛХ}};$ $A_1 = 6,28 \cdot r_1 \cdot (D_B - 2 \cdot r_1); \quad A_2 = (D_B - 2 \cdot r_1)^2;$ $A_3 = D_H^2 - D_{ш}^2; \quad A_4 = \frac{(D_B - D_H)^2}{\sin(\alpha)}$	
<p><b>2. Полусферический обратный усечённый конус:</b></p> $\alpha = 5^\circ - 10^\circ; \quad D_H = (1,15 - 1,25) \cdot D_{ш};$ $r_H = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{D_H^3 + 7,643 \cdot U_{л.} \cdot \text{tg}(\alpha)}{1 + 2 \cdot \text{tg}(\alpha)}};$ $D_B = 2 \cdot r_H; \quad h = \frac{D_B - D_H}{2 \cdot \text{tg}(\alpha)};$ <p>модуль охлаждения прибыли:</p> $R_H^1 = \frac{U_{л.}}{B_1 + B_2 + B_3 - S_{ЛХ}}; \quad B_1 = 12,56 \cdot r_H^2;$ $B_2 = \frac{3,14 \cdot h \cdot (r_H + 0,5 \cdot D_H)}{\cos(\alpha)}; \quad B_3 = 0,785 \cdot (D_H^2 - D_{ш}^2)$	
<p><b>3. Полусферическая цилиндрическая:</b></p> $r_H = \sqrt[3]{0,273 \cdot U_{л.}}; \quad h = r_H;$ <p>модуль охлаждения прибыли:</p> $R_H^1 = \frac{U_{л.}}{C_1 - C_2 - S_{ЛХ}};$ $C_1 = 15,7 \cdot r_H^2; \quad C_2 = 0,785 \cdot D_{ш}^2$	

Примечание.  $S_{ЛХ}$  - площадь поперечного сечения литникового хода, примыкающего к прибыли.



Формулы для расчёта

минимально-допустимых размеров прибылей кольцевого типа

Формулы для расчёта размеров кольцевых прибылей

Схемы прибылей

$$\alpha_1 = 5^\circ - 10^\circ, \quad D_2 = (1,1 - 1,2) \cdot D_1;$$

$$D_3 = \frac{\sqrt{K_2^2 + 4 \cdot K_1 \cdot K_3} - K_2}{2 \cdot K_1};$$

$$K_1 = 0,785 \cdot \left[ 1 + \frac{1}{\sin(\alpha_1)} \right];$$

$$K_2 = 1,57 \cdot \frac{D_0}{lg(\alpha_1)};$$

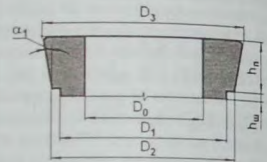
$$K_3 = J_1 + J_2 + J_3 + \frac{U_{II}}{R_{II}^1 \cdot \sqrt{A}};$$

$$A = \frac{1}{1 - 3 \cdot \beta};$$

$$J_1 = 0,785 \cdot D_0^2;$$

$$J_2 = \frac{1,57 \cdot D_0 \cdot D_2}{lg(\alpha_1)};$$

$$J_3 = 0,785 \cdot D_2^2 \cdot \left[ 1 - \frac{1}{\sin(\alpha_1)} \right];$$



$$r = 2,68 + 0,866 \cdot \sqrt{9,85 - D_1 + D_0}$$

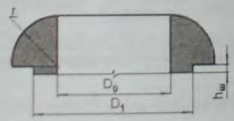
$$U_{II} = 2,5 \cdot r^3 \cdot D_0;$$

модуль охлаждения прибыли.

$$R_{II}^1 = \frac{U_{II}}{8,1 \cdot D_0 \cdot r + 0,785 \cdot [(D_0 + 2 \cdot r)^2 - D_1^2]}$$

приведенная толщина прибыли.

$$R_{II} = \frac{0,785 \cdot r^2}{3,57 \cdot r - 0,5 \cdot (D_1 - D_0)}$$



Значения коэффициентов  $\beta$  для сплавов, наиболее часто используемых в лите по выплавляемым моделям, приведены в табл. 3.21.

Кoeffициенты объёмной усадки сплавов при переходе из жидкого состояния в твёрдое Таблица 3.21

Материал	$\beta \cdot 10^3$	Материал	$\beta \cdot 10^3$
<b>1. СТАЛЬ</b>			
низкоуглеродистая	32-38	<b>5. БРОНЗА**</b>	
среднеуглеродистая	35-46	- оловянная	38-44
высокоуглеродистая	45-53	- оловянно-цинковая	
низко- и среднелегированная	35-45	- оловянно-свинцовая	43-48
высоколегированная:		- марганцовистая	57-60
- ферритная	39-50	- алюминиевая	
- аустенитно-ферритная	52-64	алюминиево-железная	70-76
- аустенитная	62-69	<b>6. ЛАТУНЬ**</b>	
- марганцовистая	75-90	алюминиевая	36-38
<b>2. ЧУГУН*</b>			
СЧ	(C+Si/3)%:	марганцовая	42-46
3,50	30	кремнистая	48-54
3,86	24	оловянная	52-55
4,13	15	никелевая	60-63
ВЧ	(C+Si/3)%:	свинцовая	65-69
3,70	60	<b>7. АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ**</b>	
4,09	45	Al	58
4,81	20	Системы:	
<b>3. НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ</b>			
(жаропрочные сплавы типа ЖС, ВЖЛ)	70-75	Al - Si	30-39
<b>4. ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ</b>			
	31-35	Al - Si - Cu	40-45
		Al - Cu	60-69
		Al - Mg	48-52
		Высоколегированные сплавы	62-70
		<b>8. МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ</b>	
			45-55

Примечание. \* - [271]; \*\* - обработка данных [128; 170; 270].

Следует отметить, что при расчёте приведенной толщины (модуля охлаждения) термического узла отливки следует учитывать его расположение относительно окружающих его стенок отливки. В качестве примера на рис. 3.72 представлены три схемы расположения тела термических узлов с одинаковым модулем охлаждения. При этом тело термического узла, представленного на рис. 3.72, а, полностью находится на внешней поверхности отливки, а тела термических узлов, представленных на рис. 3.72, б, в, частично (см. рис. 3.72, б) или полностью (см. рис. 3.72, в) заглублены во внутреннее пространство отливки.

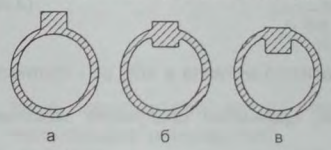


Рис. 3.72. Схемы расположения термического узла на отливке цилиндрического типа

3.72.б -  $K_1 = 1,25$ , для схемы, представленной на рис. 3.72.в -  $K_1 = 1,7$ .

Следующим этапом в расчёте размеров ЛПС является определение размеров стояка и ЛВ. Проводя расчёты размеров прибыли, изначально предполагали, что для подпитки отливки и прибыли расплавом через литниковый ход в стояке находится достаточное количество жидкого металла. В связи с этим обязательным условием нормальной работы прибыли является сохранение в стояке, к моменту полного затвердевания металла в литниковом ходе, уровня расплава,



равного или большего верхнего уровня металла в прибыли. Это условие особенно важно для верхних прибылей, поскольку недостаточное количество расплава в стояке приведёт к нарушению баланса питания отливки и проникновению усадочной раковины в её тело из прибыли.

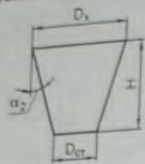


Рис. 3.73. Схема к расчёту размеров ЛВ

объём ЛВ можно рассчитать по формуле:

$$U_{ЛВ} = \gamma \beta \cdot \Delta t \cdot U_{\Phi} + \Psi_{ЛВ} \cdot U_{ЛВ} \quad (3.37)$$

или

$$U_{ЛВ} = \frac{\gamma \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot U_{\Phi}}{1 - \Psi_{ЛВ}} \quad (3.38)$$

$$\Psi_{ЛВ} = \left( \frac{R'_{ЛВ}}{R'_{ЛВ}} \right)^2$$

где  $\gamma$  – коэффициент пропорциональности (для сталей  $\gamma = 0,0126$ );  $\Delta t$  – перегрев расплава над температурой ликвидус сплава,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $U_{\Phi}$  – объём жидкого металла в КО без учёта объёма металла в ЛВ;  $\Psi_{ЛВ}$  – доля затвердевшего металла в ЛВ в момент полного затвердевания металла в литниковом ходе.

Объём жидкого металла в КО рассчитываем по формуле:

$$U_{\Phi} = \frac{M_{МФ}}{(1 + \gamma \cdot \beta \cdot \Delta t) \cdot \rho_1} \quad (3.39)$$

где  $M_{МФ}$  – металлоёмкость формы (масса залитого металла в КО);  $\rho_1$  – плотность металла при  $20^{\circ}\text{C}$ .

Исходя из конструктивных соображений, принимаем следующие зависимости.

$$R_{СТ} = 1,2 \cdot R_{ЛВ} \quad (3.40)$$

$$R_{ЛВ} = 1,44 \cdot R_{ЛВ} \quad (3.41)$$

Для проведения дальнейших расчетов необходимо определиться с профилем сечения стояка и рассчитать его приведенную толщину сечения:

$$R_{СТ} = \frac{S_{СТ}}{P_{СТ}} \quad (3.42)$$

где  $S_{СТ}$  и  $P_{СТ}$  – площадь сечения и периметр стояка, соответственно.

Совместное решение уравнений (3.39) и (3.40) даёт следующее значение размеров стояков круглого и квадратного сечения:

$$D_{СТ} = a = 4,8 \cdot R_{ЛВ} \quad (3.43)$$

где  $D_{СТ}$  – диаметр стояка;  $a$  – длина стороны стояка квадратного сечения.

Исходя из этого, размеры ЛВ определим следующим образом (см. рис. 3.73). Нижний (меньший) диаметр ЛВ рассчитываем по формуле (3.42). Угол конусности ( $\alpha_2$ ), высоту  $H$  и верхний (большой) диаметр ( $D_x$ ) воронки назначаем из конструктивных соображений, исходя из условий удобства заливки КО (формы) металлом.

В этом случае объём ЛВ и площадь её охлаждаемой поверхности рассчитываем по уравнениям:

$$V_{ЛВ} = 0,26 \cdot H \cdot (D_x^2 + D_x \cdot D_{СТ} + D_{СТ}^2) \quad (3.44)$$

$$S_{ЛВ} = \frac{1,57 \cdot H \cdot (D_x + D_{СТ})}{\cos(\alpha_2)} \quad (3.45)$$

Задача подбора ЛВ считается решённой, если объём ЛВ, рассчитанный по формуле (3.44), больше или равен значению, полученному в результате расчёта по формуле (3.38), а также выполняется отношение:

$$\frac{U_{ЛВ}}{S_{ЛВ}} \geq 1,44 \cdot R_{ЛВ} \quad (3.46)$$

Таким образом, для расчёта размеров прибылей по компенсационному методу, разработанному автором, следует выполнить следующие действия.

1. Выбрать форму прибыли и, при необходимости, рассчитать количество прибылей, устанавливаемых на данный термический узел.
2. Определить объём жидкого металла отливки или её части, питаемой от данной прибыли, по формуле:

$$U_{\Phi} = \frac{(1 + \beta) \cdot M}{\rho_1} \quad (3.47)$$

где  $M$  – масса отливки или её части, питаемой от данной прибыли, г;  $\rho_1$  – плотность твёрдого металла,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

3. Используя чертеж отливки, рассчитать площадь поверхности отливки или её части, питаемой от данной прибыли и контактирующей с КО.
4. Используя чертеж отливки, рассчитать объём и площадь поверхности термического узла отливки, на котором будет установлена данная прибыль.
5. Рассчитать приведенную толщину термического узла отливки.
6. Рассчитать приведенную толщину отливки или её части, питаемой от данной прибыли.
7. Из конструктивных соображений назначить форму и сечение литникового хода.
8. Рассчитать приведенную толщину литникового хода.



9. В формуле (3.36) рассчитать значение  $A$  с использованием данных табл. 3.21.

10. По формуле (3.36) рассчитать объём прибыли.

11. Выбрать форму прибыли и её приведенную толщину.

12. Провести проверку выполнения условия  $\frac{R_{\text{Л}}}{R_{\text{В}}} > 1$ . В случае невыполнения

данного условия принять другую форму прибыли и, по соответствующим таблицам, провести расчёт её размеров с последующей проверкой выполнения вышеприведенного условия.

13. Из конструктивных соображений задаться формой сечения стояка и рассчитать размеры его сечения по формуле (3.43).

14. В случае применения в ЛПС прибылей, расположенных над верхним уровнем отливки, рассчитать по формуле (3.37) минимально допустимый объём ЛВ и выбрать её габаритные размеры, используя уравнения (3.41), (3.44) и (3.45).

**Пример 3.6.** Рассчитать, по компенсационному методу размеры прибыли атмосферного давления для отливки "Цилиндр", модельный блок которой представлен на рис. 3.74. На рис. 3.74 обозначены: 1 – литниковая воронка; 2 – стояк; 3 – литниковый ход; 4 – прибыль; 5 – шейка прибыли; 6 – отливка. Материал отливки – сталь 10X18H9Л. Масса отливки – 960 г. Плотность стали при 20°C  $\rho_{\text{ст}} = 7,81 \text{ г/см}^3$ . Форма прибыли – полусферический обратный усечённый конус ( $\alpha = 7^\circ$ ). Сечение литникового хода –  $2 \times 2,5 \text{ см}$ .

1. Рассчитаем объём жидкого металла отливки по нижеприведенной формуле, приняв по табл. 3.21 величину коэффициента объёмной усадки для аустенитно-ферритной стали 10X18H9Л равной  $\beta = 0,058$ :

$$U_0 = (1 + \beta) M / \rho_{\text{ст}} = (1 + 0,058) 960 / 7,81 = 130 \text{ см}^3$$

2. Рассчитаем площадь поверхности отливки ( $S_0$ ), контактирующей с КО.

Согласно рис. 3.74 отливка с КО контактирует поверхностями  $f, m, k, p$ . Исходя из этого, искомая площадь поверхности:

$$S_0 = S_f + S_m + S_k + S_p,$$

где  $S_f, S_m, S_k, S_p$  – площади поверхностей  $f, m, k, p$  соответственно,  $\text{см}^2$ .

Расчёт суммы площадей вышеперечисленных поверхностей, проведённый с использованием чертежа отливки (см. рис. 3.74), даёт значение  $S_0 = 154 \text{ см}^2$ .

3. Рассчитаем по чертежу отливки объём её термического узла.

В рассматриваемой отливке термическим узлом является её цилиндрическая часть диаметром  $D_0 = 40 \text{ мм}$  (4 см) и протяжённостью  $L_1 = 60 \text{ мм}$  = 6 см. В этом случае объём термического узла отливки составит:

$$U_{\text{Т}} = \pi \cdot D_0^2 \cdot L_1 / 4 = 3,14 \cdot 4^2 \cdot 6 / 4 = 75,4 \text{ см}^3$$

4. Рассчитаем площадь поверхности термического узла отливки, контактирующего с формой по формуле:

$$S_{\text{Т}} = S_{\text{Т}} + S_{\text{м}}$$

Расчёт величины  $S_{\text{Т}}$  по чертежу отливки, даёт значение  $80,8 \text{ см}^2$ .

5. Рассчитаем модуль охлаждения термического узла отливки:

$$R_{\text{Т}}^1 = U_{\text{Т}} / S_{\text{Т}} = 75,4 / 80,8 = 0,93 \text{ см}$$

6. Рассчитаем модуль охлаждения отливки:

$$R_0^1 = U_0 / S_0 = 130 / 154 = 0,84 \text{ см}$$

7. Рассчитаем приведенную толщину сечения литникового хода:

$$R_{\text{ЛХ}} = S_{\text{ЛХ}} / P_{\text{ЛХ}} = 2 \cdot 2,5 / 2 \cdot (2 + 2,5) = 0,55 \text{ см}$$

8. Рассчитаем значение  $A$  по формуле (3.36):

$$A = 1 / (1 - 3\beta) = 1 / (1 - 3 \cdot 0,058) = 1,21$$

9. Рассчитаем долю затвердевшего металла в отливке ( $\Psi_0$ ) и её термическом узле ( $\Psi_{\text{Т}}$ ) за время затвердевания металла в литниковом ходе в принятой конструкции ЛПС:

$$\Psi_0 = (R_{\text{ЛХ}} / R_0^1)^2 = (0,55 / 0,84)^2 = 0,42;$$

$$\Psi_{\text{Т}} = (R_{\text{ЛХ}} / R_{\text{Т}}^1)^2 = (0,55 / 0,93)^2 = 0,35$$

10. По формуле (3.36) рассчитаем объём прибыли:

$$U_{\text{П}} = (1 - \Psi_0) \cdot U_0 / (1 + \Psi_{\text{Т}} / A - \Psi_0) = (1 - 0,42) \cdot 130 / (1 + 0,35 / 1,21 - 0,42) = 87 \text{ см}^3$$

11. По формулам табл. 3.19 вычислим значения размеров прибыли в форме полусферического обратного усечённого конуса для принятых размеров ЛПС:

$$D_{\text{Н}} = 1,2 \cdot D_{\text{Ш}} = 1,2 \cdot 4 = 4,8 \text{ см};$$

$$r_{\text{Н}} = 0,5 \cdot \left[ (D_{\text{Н}} + 7,643 \cdot U_{\text{П}} \cdot \text{tg}(\alpha)) / (1 + 2 \cdot \text{tg}(\alpha)) \right]^{1/3} =$$

$$= 0,5 \cdot \left[ (4,8 + 7,643 \cdot 87 \cdot 0,1228) / (1 + 2 \cdot 0,1228) \right]^{1/3} = 2,7 \text{ см};$$

$$D_{\text{В}} = 2 \cdot r_{\text{Н}} = 2 \cdot 2,7 = 5,4 \text{ см};$$

$$h = (D_{\text{В}} - D_{\text{Н}}) / 2 \cdot \text{tg}(\alpha) = (5,4 - 4,8) / 2 \cdot 0,1228 = 2,4 \text{ см};$$

$$R_{\text{П}}^1 = U_{\text{П}} / (B_1 + B_2 + B_3 - S_{\text{ЛХ}}) = 1,0235 \text{ см}$$

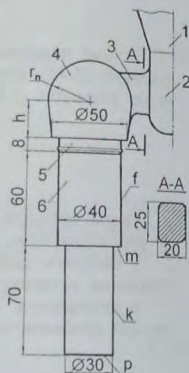


Рис. 3.74. Схема модельного блока отливки "Цилиндр"



Проверим выполнение условия  $\frac{R_{лв}^*}{R_{лв}} > 1$ :

$$R_{лв}^* / R_{лв} = 1,0235 / 0,93 = 1,1 > 1$$

Условие выполнено.

12. Приняв стояк, для ЛПС данной отливки, круглого сечения, по формуле (3.43) рассчитаем его диаметр.

$$D_{ст} = 4,8 R_{лх} = 4,8 \cdot 0,55 = 2,7 \text{ см.}$$

13. Поскольку в данном примере рассчитывается верхняя прибыль, то необходимо подобрать ЛВ соответствующих размеров. Для этого рассчитаем минимально допустимый объем ЛВ, приняв перегрев металла в КО при её заливке равным  $\Delta t = 100^\circ\text{C}$  и теплоемкость  $M_{мф} = 1970 \text{ г}$ :

$$\Psi_{лв} = (R_{лх} / R_{лв}^*)^2 = (R_{лх} / 1,44 R_{лх}^*)^2 = 1 / 1,44 = 0,48;$$

$$U_{ф} = M_{мф} / (1 + \gamma \beta \Delta t_{р.и}) = 1970 / (1 + 0,0126 \cdot 0,058 \cdot 100) = 7,81 = 235 \text{ см}^3;$$

$$U_{лв} = \gamma \beta \Delta t U_{ф} / (1 - \Psi_{лв}) = 0,0126 \cdot 0,058 \cdot 100 \cdot 235 / (1 - 0,48) = 33 \text{ см}^3.$$

По формулам (3.44) и (3.45) рассчитаем объем и площадь охлаждения ЛВ со следующими размерами  $D_{ст} = 2,7 \text{ см}$ ,  $D_x = 7 \text{ см}$ ,  $H = 7 \text{ см}$ ,  $\alpha_2 = 18^\circ$ :

$$U_{лв} = 0,26 H (D_x^2 + D_x D_{ст} + D_{ст}^2) = 0,26 \cdot 7 \cdot (7^2 + 7 \cdot 2,7 + 2,7^2) = 137 \text{ см}^3$$

$$S_{лв} = 1,57 H (D_x + D_{ст}) / \cos(\alpha_2) = 1,57 \cdot 7 \cdot (7 + 2,7) / 0,9511 = 112 \text{ см}^2$$

Определим модуль охлаждения ЛВ:

$$R_{лв}^* = U_{лв} / S_{лв} = 137 / 112 = 1,22 \text{ см.}$$

Анализ полученных значений показывает, что объем ЛВ с принятыми размерами больше минимально допустимого значения, рассчитанного по формуле (3.40), и её приведенная толщина  $R_{лв}^* = 1,22 \text{ см}$  превышает величину  $1,44 R_{лх} = 1,44 \cdot 0,55 = 0,79 \text{ см}$ . Следовательно, ЛВ с принятыми размерами обеспечивает необходимые условия питания отливки. Расчёт завершен.

Результаты проведенных расчетов объема прибыли на отливку "Цилиндр" показывают, что объем прибыли, рассчитанный по методу вписанных сфер, составил  $650 \text{ см}^3$ , по комплексному методу –  $104,5 \text{ см}^3$ , по компенсационному методу –  $87 \text{ см}^3$ .

Рассматривая вопрос об эффективности работы прибыли, необходимо отметить, что самой низкой эффективностью обладают прибыли, заполняемые расплавом в процессе заливки через тело отливки ("непроливаемые" прибыли). При таком способе заполнения прибылей неэффективными, а в ряде случаев и недопустимыми, оказываются прибыли бокового питания, установленные, например, на тонких протяженных стенках отливки.

Низкая эффективность работы таких прибылей объясняется тем, что заполнение полости прибыли расплавом через тело отливки сопровождается ин-

тенсивным нагревом КО в области шейки прибыли (для боковых прибылей, устанавливаемых на тонких стенках отливки). Этот нагрев, в ряде случаев, приводит к изменению знака температурного градиента в системе отливка-прибыль и, как правило, к образованию усадочных дефектов в подприбыльной части отливки.

Для боковых и нижних компактных термических узлов (приливы, платики, бошкы и т.п.) вместо местных "непроливаемых" прибылей следует использовать термические узлы необходимо установить "проливаемые" прибыли или питатели с коллекторами.

**Прибыли кольцевого типа.** Питание верхних и нижних термических узлов кольцевого типа осуществляют с помощью прибыли кольцевого типа. Расчёт размеров любых кольцевых прибылей рекомендуется проводить по компенсационному методу с использованием, например, уравнений, приведенных в табл. 3.20. При этом эффективная работа нижних прибылей кольцевого типа реализуется только при выполнении следующего условия.

$$R_y < R_n \leq R_{лх} \leq R_{ст}. \quad (3.48)$$

**Прибыли боковые (отводные).** В отличие от верхних прибылей, эффективная работа боковых прибылей реализуется только при выполнении условия (3.48). То есть, для обеспечения эффективной работы боковых прибылей, при проектировании ЛПС, необходимо использовать схему питания А (см табл. 3.18), при этом, боковая прибыль должна быть "проливаема".

Если заливка КО проводится в атмосферных условиях, то для повышения эффективности работы боковых "проливаемых" прибылей следует использовать воздействие на них атмосферного давления. Для боковых и нижних кольцевых прибылей воздействие атмосферного давления на жидкий металл отливки реализуется опосредованно, через зеркало металла в стояке и (или) ЛВ. В связи с этим использование стержней атмосферного давления в таких прибылях нецелесообразно.

В процессе кристаллизации металла в стояке или ЛВ, как правило, образуются так называемые "мосты" из затвердевшего металла, перекрывающие канал сообщения между атмосферой и зеркалом металла. С момента образования первого "моста" воздействие атмосферного давления на кристаллизующийся металл прекращается и возрастает вероятность образования в отливке значительных усадочных дефектов. С целью предупреждения образования "мостов" необходимо уменьшить тепловой поток от зеркала расплава в стояке и (или) ЛВ в атмосферу.

Одним из наиболее простых и эффективных способов предотвращения образования "мостов" в стояке является утепление зеркала металла в ЛВ. Для этого, непосредственно после заливки КО, на зеркало металла в ЛВ укладывают, предварительно прокалившую при  $700 \dots 980^\circ\text{C}$  плитку легковесного шамота толщиной  $15 \dots 25 \text{ мм}$  и диаметром  $50 \dots 60 \text{ мм}$ .

Размеры боковой прибыли, которая имеет конфигурацию, представленную на схеме рис. 3.75 (на рис. 3.75 обозначены: 1 – отливка, 2 – шейка прибыли, 3 – подводящий расплав литниковый ход, 4 – прибыль боковая), автор рекомендует рассчитывать по следующим уравнениям:

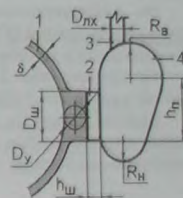


Рис. 3.75. Схема боковой прибыли



$$R_H = 0,5 (D_y + h_{ш});$$

$$R_B = (1,50 \dots 1,57) R_H;$$

$$h_{П} = (1,25 \dots 1,40) D_{ш}$$

При этом диаметр литникового хода ( $D_{ЛХ}$ ), подводящего в боковую прибыль расплава, должен быть не менее двух толщин стенки отливки, а конструкция литниковой системы должна обеспечить заполнение боковой прибыли расплавом, в процессе заливки формы, через её верхний литниковый ход диаметром  $D_{ЛХ}$  на прибыли расположенный ближе к телу отливки, как, например, это представлено на рис. 3.75.

Рекомендуется подводящий литниковый ход диаметром  $D_{ЛХ}$  на прибыли располагать ближе к телу отливки, как, например, это представлено на рис. 3.75.

**Пример 3.7 (Смешанная схема питания).** Компенсационным методом рассчитать размеры кольцевых прибылей для отливки "Полый цилиндр", модельный блок которой представлен на рис. 3.76. Материал отливки – сталь 12Х18Н10ТЛ. Масса отливки – 19215 г.

ЛПС данной отливки относится к смешанному типу (А – F) согласно табл. 3.18, поскольку схема питания отливки от нижней прибыли – А, а от верхней прибыли – F.

Расчет элементов ЛПС смешанного типа следует проводить последовательно: от нижних к верхним термическим узлам.

Для начала расчетов, определяем по чертежу отливки ее объем ( $U_0$ ) и площадь поверхности ( $S_0$ ), контактирующую с поверхностью КО, а также объем ( $U_y$ ) и площадь поверхности ( $S_y$ ) термических узлов, контактирующих с КО. Согласно рис. 3.76 размеры термических узлов данной отливки одинаковы и имеют следующие значения параметров:  $U_y = 603 \text{ см}^3$ ,  $S_y = 537 \text{ см}^2$ .

Для отливки данные параметры, рассчитанные с использованием рис. 3.76, имеют следующие значения:  $U_0 = 2460 \text{ см}^3$ ,  $S_0 = 3344 \text{ см}^2$ .

Из конструктивных соображений принимаем для данной ЛПС стоек круглого сечения. При этом верхняя и нижняя прибыли сообщаются со стойком тремя литниковыми ходами.

По данным табл. 3.21, для стали 12Х18Н10ТЛ принимаем коэффициент объемной усадки  $\beta = 0,058$  (5,8%).

**Нижняя кольцевая прибыль.** Питание отливки от нижней прибыли реализуем по схеме питания А. При этом примем следующие соотношения модулей охлаждения (приведенных толщин сечений) элементов ЛПС:

$$R_{СТ} = R_{ЛХ} = R_{П} = 1,05 \cdot R_y^i \quad (3.49)$$

Определим значение  $R_y^i$ .

$$R_y^i = U_y / S_y = 603 / 537 = 1,123 \text{ см.}$$

Рассчитав величину  $R_y^i$ , определяем приведенные толщины сечений прибыли, литниковых ходов и стойка по формуле (3.49):

$$R_{СТ} = R_{ЛХ} = R_{П} = 1,05 \cdot R_y^i = 1,05 \cdot 1,123 = 1,18 \text{ см.}$$

Для стойка круглого сечения приведенную толщину сечения рассчитываем по формуле:

$$R_{СТ} = S_{СТ} / P_{СТ},$$

где  $S_{СТ}$  и  $P_{СТ}$  – площадь сечения стойка и его периметр, соответственно.

$$S_{СТ} = 0,785 D_{СТ}^2,$$

$$P_{СТ} = 3,14 D_{СТ},$$

где  $D_{СТ}$  – диаметр стойка.

$$R_{СТ} = 0,785 D_{СТ}^2 / 3,14 D_{СТ} = 0,25 D_{СТ}$$

или

$$R_{СТ} = 0,25 D_{СТ} = 1,18 \text{ см.}$$

Отсюда определяем диаметр стойка:

$$D_{СТ} = 1,18 / 0,25 = 4,7 \text{ см.}$$

Приняв для нижней прибыли литниковые ходы цилиндрической формы, рассчитаем диаметр их сечений по аналогии расчета диаметра стойка:

$$R_{ЛХ} = 0,25 D_{Пит} = 1,18 \text{ см.}$$

Отсюда:

$$D_{ЛХ} = 1,18 / 0,25 = 4,7 \text{ см.}$$

Для прибыли с формой поперечного сечения в виде четверти тора определим значение ( $r_H$ ) с использованием формул, приведенных в табл. 3.20.

$$r_H = 2,68 + 0,866 (9,58 - D_1 + D_0)^{0,5} = 2,68 + 0,866 (9,58 - 28 + 20)^{0,5} = 3,8 \text{ см.}$$

Рассчитав радиус нижней прибыли, определим её модуль охлаждения и приведенную толщину, используя уравнения, приведенные в табл. 3.20.

$$U_{ПН} = 2,5 = 2,5 \cdot 3,8^2 \cdot 20 = 722 \text{ см}^3,$$

$$R_{ПН}^i = U_{ПН} / \{8,1 D_0 r_H + 0,785 [(D_0 + 2 \cdot r_H)^2 - D_1^2]\},$$

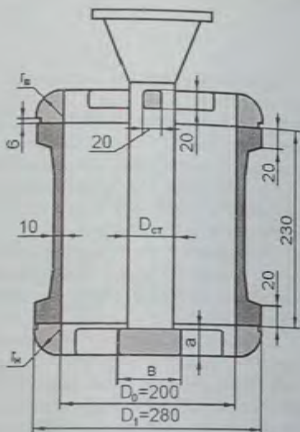


Рис. 3.76. Схема модельного блока для отливки "Полый цилиндр"



$$R_{\text{лп}}^1 = 722 / \{8,1 \cdot 20 \cdot 3,8 + 0,785 [(20 + 2 \cdot 3,8)^2 - 28^2]\} = 1,207 \text{ см.}$$

Для расчёта приведенной толщины сечения нижней прибыли рассчитаем площадь её сечения и периметр, контактирующий с КО:

$$S_{\text{н}} = 0,785 \cdot r_{\text{н}}^2 = 0,785 \cdot 3,8^2 = 11,33 \text{ см}^2$$

$$P_{\text{н}} = 3,57 \cdot r_{\text{н}} - 0,5 (D_1 - D_0) = 3,57 \cdot 3,8 - 0,5 (28 - 20) = 9,566 \text{ см}$$

$$R_{\text{пн}} = S_{\text{н}} / P_{\text{н}} = 11,33 / 9,566 = 1,18 \text{ см}$$

Расчитанное значение  $R_{\text{пн}}$  удовлетворяет условию (3.19).

Полученное значение  $r_{\text{н}} < D_{\text{лп}}$ . В связи с этим необходимо изменить форму литниковых ходов, например, приняв для них прямоугольную форму сечения с величиной одной из сторон  $a = r_{\text{н}} = 3,8 \text{ см}$ . В этом случае для литникового хода прямоугольного сечения шириной (в) запишем уравнение его приведенной толщины:

$$R_{\text{лп}} = S_{\text{лп}} / P_{\text{лп}} = 0,5 \cdot a \cdot v / (a+v) = 1,18 \text{ см.}$$

Отсюда находим ширину литникового хода нижней кольцевой прибыли:

$$v = 2,36 \cdot a / (a - 2,36) = 2,36 \cdot 3,8 / (3,8 - 2,36) = 6,2 \text{ см.}$$

Верхняя кольцевая прибыль. Для расчета размеров верхней прибыли сделаем следующее допущение. Поскольку данная отливка осесимметрична и равностенна, то каждая из прибылей питает соответствующую половину отливки. Следовательно, для верхней кольцевой прибыли объем жидкого металла питаемой части отливки составит:

$$U_{\text{ов}} = 0,5 U_0 = 0,5 (1+\beta) \cdot M / \rho_1 = 0,5 (1+0,058) \cdot 19215 / 7,81 = 1302 \text{ см}^3$$

Соответственно, площадь поверхности половины отливки, контактирующей с КО, составит:

$$S_{\text{ов}} = 0,5 S_0 = 0,5 \cdot 3344 = 1672 \text{ см}^2$$

Модуль охлаждения верхней половины отливки составит:

$$R_{\text{ов}}^1 = U_{\text{ов}} / S_{\text{ов}} = 1302 / 1672 = 0,78 \text{ см.}$$

Для дальнейших расчетов размеров верхней прибыли необходимо принять форму и размеры сечения её литниковых ходов. В данном случае примем литниковый ход квадратного сечения с размерами  $2 \times 2 \text{ см}$ .

Расчитаем приведенную толщину сечения литникового хода:

$$R_{\text{лп}} = S_{\text{лп}} / P_{\text{лп}} = 2 \cdot 2 / 2 (2+2) = 0,5 \text{ см.}$$

Расчитаем значение  $A$  по формуле (3.38):

$$A = 1 / (1 - 3\beta) = 1 / (1 - 3 \cdot 0,058) = 1,21$$

Определим долю затвердевшего металла в верхней половине отливки ( $\Psi_{\text{ов}}$ ) и её термическом узле ( $\Psi_{\text{у}}$ ) к моменту полного затвердевания металла в литниковых ходах:

$$\Psi_{\text{ов}} = (R_{\text{лп}} / R_{\text{ов}}^1)^2 = (0,5 / 0,78)^2 = 0,41;$$

$$\Psi_{\text{у}} = (R_{\text{лп}} / R_{\text{у}}^1)^2 = (0,5 / 1,123)^2 = 0,2.$$

По формуле (3.36) рассчитаем объем верхней прибыли:

$$U_{\text{пв}} = (1 - \Psi_{\text{ов}}) \cdot U_{\text{ов}} / (1 + \Psi_{\text{у}} / A - \Psi_{\text{ов}}) = (1 - 0,41) \cdot 1302 / (1 + 0,2 / 1,21 - 0,41) = 1004 \text{ см}^3$$

По формуле, приведенной в табл. 3.20, рассчитываем значение  $r_{\text{в}}$  для прибыли соответствующей формы:

$$r_{\text{в}} = (0,4 U_{\text{пв}} / D_0)^{0,5} = (0,4 \cdot 1004 / 20)^{0,5} = 4,5 \text{ см.}$$

Модуль охлаждения данной прибыли составит:

$$R_{\text{пв}} = U_{\text{пв}} / S_{\text{пв}}$$

$$S_{\text{пв}} = 8,1 \cdot r_{\text{в}} \cdot D_0 + 0,785 [(D_0 + 2 \cdot r_{\text{в}})^2 - D_1^2] = 8,1 \cdot 4,5 \cdot 20 + 0,785 [(20 + 2 \cdot 4,5)^2 - 28^2] = 774 \text{ см}^2$$

или

$$R_{\text{пв}} = 1004 / 774 = 1,3 \text{ см.}$$

Значение  $R_{\text{пв}} > R_{\text{у}}^1$ , следовательно, прибыль данных размеров и конфигурации обеспечивает достаточные условия питания верхней части отливки.

Расчёт размеров верхней прибыли завершен.

Таким образом, для обеспечения достаточных условий питания отливки, модельный блок которой представлен на рис. 3.76, необходимо установить ЛПС следующих размеров: стоек круглого сечения диаметром (не менее) 4,7 см, форма сечения прибылей – четверть тора; количество литниковых ходов от стойки к каждой прибыли – 3 шт; сечение литникового хода верхней прибыли –  $2 \times 2 \text{ см}$ ; сечение литникового хода нижней прибыли –  $3,8 \times 6,2 \text{ см}$ ; для верхней прибыли –  $r_{\text{в}} = 4,5 \text{ см}$ ; для нижней прибыли –  $r_{\text{н}} = 3,8 \text{ см}$ .

Компенсационный метод расчета, учитывающий подлитку (компенсацию) затвердевающей отливки металлом из литниковых каналов, позволяет минимизировать размеры прибылей. В случае единичного, мелкосерийного или серийного производства отливок для изготовления моделей прибылей экономически целесообразным является использование уже существующих в литейном цехе пресс-форм. При этом размеры элементов ЛПС могут существенно отличаться от оптимальных в большую сторону. Тем не менее, в условиях существующего на предприятии парка пресс-форм расход металла на ЛПС можно минимизировать за счёт правильного подбора пресс-форм прибылей и литниковой системы.

Для выполнения данной задачи необходимо иметь следующие данные:

- объемы ( $U_{\text{п}}$ ) и приведенные толщины ( $R_{\text{п}}$ ) моделей прибылей, получаемых в существующих на предприятии пресс-формах.



- объём отливки ( $U_0$ ) или её части ( $U_y$ ), питаемой от данной прибыли;  
 - приведенную толщину отливки ( $R_0$ );  
 - приведенную толщину термического узла отливки ( $R_y$ ), на который планируется установить данную прибыль;  
 - коэффициент объёмной усадки ( $\beta$ ) металла отливки при затвердевании.  
 Выбор необходимых прибылей и литников из числа существующих следует начать с отбора прибылей, размеры которых обеспечивают выполнение условия:

$$\left(\frac{R_y^3}{R_0^3}\right)^2 > \frac{1}{1-3\cdot\beta} \quad (3.50)$$

При этом предпочтение следует отдавать прибыли с наименьшим значением величины  $\left(\frac{R_y^3}{R_0^3}\right)^2$ .

Для выбора соответствующих литников следует рассчитать минимально допустимое значение приведенной толщины сечения литникового хода (для коротких литниковых ходов) или модуль охлаждения литникового хода (для протяжённых литниковых ходов).

Искомое минимально допустимое значение  $R_{лх. мин}$  находим по формуле:

$$R_{лх. мин} = \sqrt{\frac{U_0 - U_{л.}}{E_1 - E_2}}; \quad (3.51)$$

$$E_1 = \frac{U_{л.}}{(R_{л.}^1)^2}; \quad E_2 = \frac{U_0 - U_{л.}}{(R_0^1)^2}.$$

Вычислив значение  $R_{лх. мин}$ , подбираем из числа существующих на предприятии пресс-форм литник, имеющий приведенную толщину равную или наиболее близкую, но большую, к полученному расчётному значению. При этом размеры стояка и ЛВ подбирают с учетом выполнения условий (3.40), (3.41) и (3.44)  $\geq$  (3.38). В том случае, если набирается несколько удовлетворяющих вышеприведенным условиям вариантов, предпочтение следует отдать варианту, обеспечивающему наибольший выход годного.

**Радиус (дистанция) действия прибыли и торца отливки.** При проектировании прибылей и расчёте их количества на протяжённом термическом узле отливки необходимо учитывать радиус действия прибылей и торца отливки.

Радиус (дистанция) действия прибыли — расстояние от торца или основания шейки прибыли до определённого сечения отливки, на протяжении которого затвердевание металла происходит без образования значительных усадочных или газосадочных дефектов в осевой зоне стенки отливки.

Радиус (дистанция) действия торца отливки — расстояние от непитаемого торца отливки до её определённого сечения, на протяжении которого затвердевание металла происходит без образования значительных усадочных или газосадочных дефектов в осевой зоне отливки.

Формирование плотного металла в частях отливки прилегающих к прибыли и торцу отливки обеспечивается благоприятными условиями массопереноса в двухфазной области затвердевающего металла отливки. На рис. 3.77 представлено распределение температуры в осевой части отливки с размерами  $30 \times 100 \times 340$  мм из стали 30Л в момент времени, когда температура в центре отливки (термопара № 6) достигла среднего значения между температурой ликвидус и температурой солидус данного сплава. Характер распределения температуры ( $T$ ) вдоль тела затвердевающей плоской отливки (см. рис. 3.77) свидетельствует, что затвердевание металла в торце отливки (термопары № 8, №11) и в части отливки прилегающей к прибыли (термопары № 1... № 5), проходит при большем термическом градиенте, чем затвердевание металла в центральной части отливки (термопары №5... № 8). Естественно, что затвердевание металла при более высоком продольном температурном градиенте отливки способствует большей степени направленности её затвердевания и, следовательно, повышению плотности металла отливки за счёт более интенсивного массопереноса расплава из прибыли к фронту кристаллизации металла. То есть получение наиболее плотного металла в отливке следует ожидать в областях наибольших градиентов температур, а именно — в области действия прибыли и торца отливки. Данное положение подтверждает зависимость величины усадочной пористости ( $\Pi$ ) отливки от величины удаления от прибыли, представленной на этом же рисунке.

На рис. 3.78 представлены схемы радиусов действия прибыли ( $L_n$ ) и торца ( $L_T$ ) отливки. Места положения осевой рыхлоты в отливках, схемы которых представлены на рис. 3.78, зачернены.

Допустим, что отливка или её протяжённый термический узел имеет протяжённость ( $L$ ) и диаметр вписанной в него окружности  $D_y$ . Если протяжённость отливки (термического узла) достаточно велика, то при установке прибыли на её торец (см. рис. 3.78, а, в) в её центральной части, в процессе затвердевания, образуется рыхлота, поскольку для рассматриваемого случая (см. рис. 3.78, а):

$$L > L_n + L_T + D_y;$$

для случая, представленного на рис. 3.78, в:

$$L > L_n + L_T.$$

Для предупреждения образования усадочных дефектов в отливке (термическом узле) необходимо, чтобы были выполнены следующие условия: для случая, представленного на рис. 3.78, а:

$$L \leq L_n + L_T + D_y; \quad (3.52)$$

для случая, представленного на рис. 3.78, в:

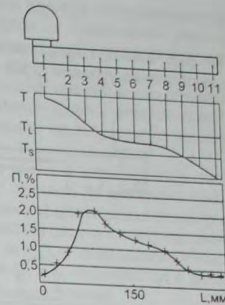


Рис. 3.77. Схема расположения термопар в отливке, распределение температуры и величины усадочной пористости в отливке



$$L \leq L_n + L_T$$

(3.53)

На рис. 3.78 б, г представлены схемы расположения прибылей, обеспечивающие выполнение условий (3.52) и (3.53).

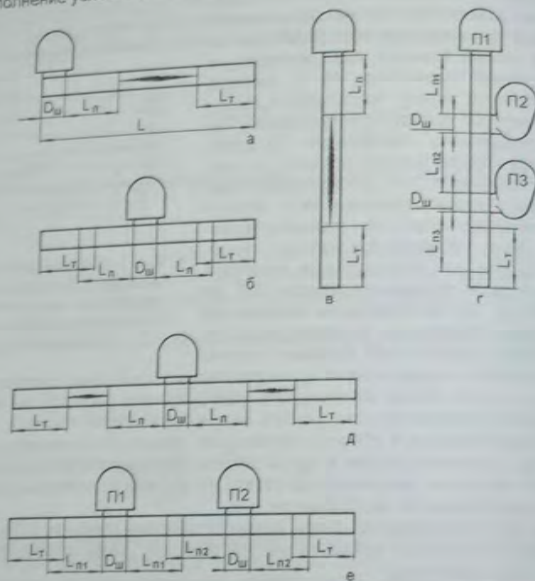


Рис. 3.78. Схемы расположения прибылей на отливках и областей усадочных рыхолот

В том случае, если отливка или её термический узел имеют значительно большую протяжённость, то установка одной прибыли по центру отливки или термического узла может оказаться недостаточной (см. рис. 3.78, д). Поэтому для получения плотного металла в отливке или термическом узле следует установить большее количество прибылей, что схематично представлено на рис. 3.78, е.

В общем случае, количество прибылей, необходимое для получения плотного металла в отливке, рассчитывают по уравнению:

$$N = \frac{L - A \cdot L_T}{D_n + B \cdot L_n} \quad (3.54)$$

где  $A$  – количество не питаемых от прибылей торцов отливки (для термических узлов кольцевого типа  $A=0$ ), шт,  $B$  – коэффициент ( $B=2$ , если прибыль располагают вдали от торцов отливки,  $B=1$ , если прибыль располагают на торце отливки).

При получении дробного значения  $N$  в результате расчёта по уравнению (3.54) значение  $N$  следует округлить в большую сторону. Если на термический узел предельную протяжённости (длины) шейки прибыли.

Говоря о радиусе действия прибыли и торца отливки, прежде всего следует оплечение о плотном металле отливки может быть основано на результатах различных методов исследования его плотности.

Под понятием "плотный" металл отливки можно иметь в виду ту часть отливки, где визуально, на макрошлифе разрезанной по оси отливки, не выявлена рыхлота, или ту часть отливки, где отсутствует рыхлота по оси отливки, не выявлена рыхлота, достигнута максимальная плотность металла отливки по результатам гидравлического контроля (длины) шейки прибыли, то в значении  $D_n$  следует подставить

Говоря о радиусе действия прибыли и торца отливки, прежде всего следует оплечение о плотном металле отливки может быть основано на результатах различных методов исследования его плотности. Под понятием "плотный" металл отливки можно иметь в виду ту часть отливки, где визуально, на макрошлифе разрезанной по оси отливки, не выявлена рыхлота, или ту часть отливки, где отсутствует рыхлота по оси отливки, не выявлена рыхлота, достигнута максимальная плотность металла отливки по результатам гидравлического контроля (длины) шейки прибыли, то в значении  $D_n$  следует подставить

$$L_n = L_T = D_n \cdot k_P [100(0,104 - \beta) + 0,09 \cdot \sqrt{\Delta t} - 2 \cdot k_T]; \quad (3.55)$$

$$k_T = \sqrt{\frac{t_L - t_S + 10}{60}}$$

где  $L_n$  и  $L_T$  – радиус (дистанция) действия прибыли и торцевого эффекта соответственно, мм;  $t_L$  и  $t_S$  – температура ликвидус и солидус сплава отливки соответственно, °C;  $\Delta t$  – перегрев металла над температурой ликвидус, °C;  $k_P$  – коэффициент ( $k_P=0,8$  для прибылей металлостатического давления,  $k_P=1$  для прибылей атмосферного давления,  $k_P=P^{0,3}$  для прибылей сверхатмосферного давления, где  $P$  – давление в прибыли, бар).

Используя уравнение (3.55), с достаточной высокой степенью точности можно рассчитать значения  $L_n$  и  $L_T$  для вышеуказанных сплавов со значениями интервала кристаллизации  $\Delta t_{\text{кр}} = t_L - t_S$  от 20 до 120°С, при перегреве поступающего в КО расплава ( $\Delta t$ ) от 50 до 170°С.

**Пример 3.8.** Рассчитать количество прибылей атмосферного давления закрытого типа, устанавливаемых на фланце отливки кольцевого типа шириной  $Ш=20$  мм и толщиной  $T=15$  мм. Внутренний диаметр фланца –  $D=230$  мм.

Температура перегрева стали над температурой ликвидус –  $\Delta t=70$ °C. Температура ликвидус и солидус стали –  $t_L=1480$ °C и  $t_S=1420$ °C соответственно. Коэффициент объёмной усадки стали –  $\beta=0,065$ .

Для решения поставленной задачи воспользуемся уравнениями (3.54) и (3.55) и, прежде всего, рассчитаем величину коэффициента  $k_T$ .



$$k_T = \sqrt{\frac{t_x - t_y + 10}{60}} = \sqrt{\frac{1480 - 1420 + 10}{60}} = 1,0393$$

Поскольку, по условию задачи, на фланец отливки будут установлены прибыли атмосферного давления, то величину  $k_T$  принимаем равной 1.

Поскольку сечение рассматриваемого элемента отливки представляет собой прямоугольник, то диаметр вписанной в него окружности будет равен величине наименьшей стороны прямоугольника. То есть  $D_y = T = 15$  мм. В этом случае:

$$L_T = 15 \cdot 1 \cdot [100(0,104 - 0,065) + 0,09 \cdot \sqrt{70} - 2 \cdot 1,0393] = 38,6 \text{ мм.}$$

Поскольку рассматриваемый элемент отливки, по сути, является кольцом и, соответственно, не имеет торцов, то величины  $A$  и  $L_T$  в уравнении (3.54) равны нулю, а величина  $B=2$ .

Для термического узла кольцевого типа его протяжённость считаем равной длине его средней линии. То есть:

$$L = 3,14(D + 0,5Ш) = 3,14(230 + 0,5 \cdot 20) = 754 \text{ мм.}$$

В этом случае количество прибылей, устанавливаемых на верхний фланец данной отливки, составит:

$$N = \frac{L}{D_y + B \cdot L_n} = \frac{754}{15 + 2 \cdot 38,6} = 8,2.$$

Принимаем количество прибылей –  $N=9$  шт.

Следует отметить, что установка девяти прибылей на фланец отливки – достаточно трудоёмкая технологическая операция в части её выполнения при монтаже модельного блока. Поэтому в данном случае более целесообразно использование прибылей кольцевого типа с девятью технологическими окнами (см. рис. 3.28,б).

### 3.6. Холодильники

В литье по выплавляемым моделям холодильники (см. рис. 3.79) преимущественно используют для получения средние и крупногабаритных отливок.

По месту положения (установки) холодильники можно классифицировать на внешние, внутренние и наружные, по способу охлаждения холодильники классифицируют на охлаждаемые и неохлаждаемые.

Внешние и внутренние холодильники контактируют непосредственно с отливкой и могут быть как охлаждаемыми, так и неохлаждаемыми. Наружные холодильники не имеют непосредственного контакта с отливкой и отделены от неё телом КО. По способу охлаждения наружные холодильники могут быть также охлаждаемыми и неохлаждаемыми.

Неохлаждаемые внешние и внутренние холодильники используют при получении отливок, затвердевающих в условиях одновременного теплоотвода со всей поверхности контакта отливки и КО (традиционный способ получения литья). Охлаждаемые холодильники (кристаллизаторы), в основном, используют при получении отливок методом направленной кристаллизации.

Неохлаждаемый внешний или внутренний холодильник – элемент КО, оформляющий локальный участок поверхности отливки, материал которого отличается от

материала КО более высокой теплоаккумулирующей способностью и, в частности, теплопроводностью. В основном, холодильники используют для интенсификации теплоотвода от отдельных термических узлов затвердевающей отливки с целью предупреждения образования в них усадочных дефектов.

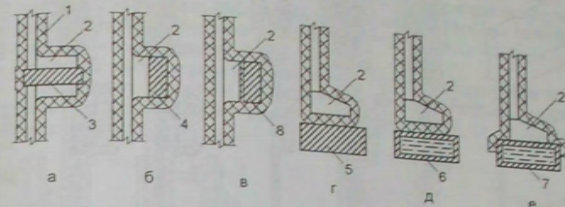


Рис. 3.79. Схемы расположения холодильников по отношению к отливке: 1 – КО; 2 – полость в КО термического узла отливки; 3 – холодильник внутренний неохлаждаемый; 4, 8 – холодильник внешний неохлаждаемый; 5 – холодильник наружный, охлаждаемый; 6 – холодильник наружный охлаждаемый; 7 – холодильник внешний охлаждаемый

В том случае, если температура заливки металла превышает начальную температуру КО, то использование внешних и внутренних холодильников весьма эффективно и зачастую позволяет достичь большего эффекта, чем использование прибылей. Следует отметить, что в литье по выплавляемым моделям холодильники используют только для теплоотвода с поверхности отливки, то есть в процессе выбки отливки из КО все холодильники с внешних и внутренних поверхностей отливки удаляют.

Технологические особенности литья по выплавляемым моделям определяют требования к материалу неохлаждаемых внешних и внутренних холодильников. В частности, материал холодильника должен иметь температуру плавления ниже температуры прокаливания КО и температуры плавления заливаемого в КО сплава, не окисляться при температуре прокаливания КО, не вступать в химическое взаимодействие с материалом КО и отливки.

Влияние холодильника на формирование отливки рассмотрим на примере отливки (см. рис. 3.80,а), представляющей собой пластину 1 с цилиндрической бобышкой в центре 2 и массивным (термическим) узлом, на котором установлена прибыль 3. Вертикальные осевые разрезы КО, отливки и прибыли представлены на рис. 3.80,б, в, д, е, где области существования металла в жидком состоянии зачернены.

На рис. 3.80,б, в, представлены разрезы затвердевающей отливки в КО без холодильника в начальный период образования твёрдой корочки затвердевающего металла (см. рис. 3.80,б) и в момент прекращения питания расплава в бобышке от прибыли (см. рис. 3.80,в). Схема расположения усадочной раковины в затвердевшей отливке и её макроструктура представлены на рис. 3.80,г.

Согласно рис. 3.80,б, после заливки расплава в КО, с понижением его температуры, начинается процесс затвердевания металла на внутренних поверхностях КО. При этом примерно одинаковая интенсивность теплоотвода от расплава в КО обеспечивает на всех её поверхностях примерно одинаковую скорость роста слоя затвердевающего металла. В этот период компенсация усадки затвердевающего металла в КО осуществляется расплавом из прибыли 3, который подступает через тон-



кую стенку отливки 1 к фронту кристаллизации металла в бобышке 2 и торцевой части отливки, расположенной под бобышкой.

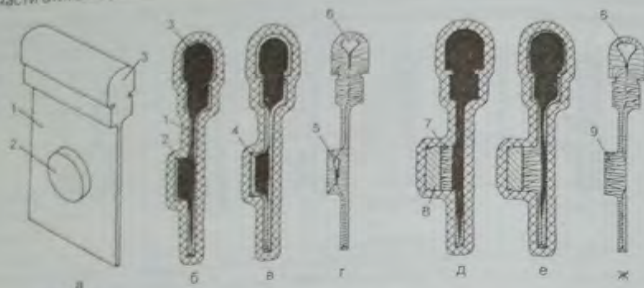


Рис. 3.80. Последовательность затвердевания отливок и их макроструктура

По прошествии определённого времени с начала затвердевания металла, расплав в тонкой торцевой части отливки, а также в стенке 1 полностью затвердевает (см. рис. 3.80, в). С окончанием затвердевания металла в стенке 1 поступление расплава из прибыли в бобышку 4 прекращается. С этого момента оставшийся расплав в области бобышки 4 затвердевает с дефицитом жидкого металла. В результате этого (см. рис. 3.80, г), к моменту окончания затвердевания отливки, в бобышке образуется усадочная раковина или рыхла 5. В свою очередь, в прибыли образуется усадочная раковина 6.

В случае установки холодильника 8 на бобышку (см. рис. 3.80, д) залитый в КО расплав наиболее интенсивно начинает затвердевать на поверхности холодильника. Теплопровод от расплава в холодильник настолько велик, что к моменту начала образования твердой корочки металла на остальных внутренних поверхностях КО расплав в области бобышки практически полностью затвердевает (см. рис. 3.80, е). То есть, в результате использования холодильника, полное затвердевание металла в бобышке происходит в условиях свободного доступа расплава из прибыли через стенку 1.

В результате – металл затвердевшей отливки в области бобышки не имеет усадочной раковины или рыхла, и, в данном примере (см. рис. 3.80, ж), представляет собой столбчатые кристаллы 9, протянувшиеся в направлении от внутренней поверхности холодильника до противоположной поверхности стенки отливки.

Примеры установки холодильников на термических узлах некоторых отливок представлены на рис. 3.81.

Для получения отливок в нагретые до 950...980°C КО, в основном, используют стальные холодильники. Такие холодильники изготавливают из сталей, стойких к окислению на воздухе при высоких (до 1000°C) температурах. При получении стальных отливок наиболее широкое распространение получили холодильники из хромоникелевых сталей типа 18-8, 23-18 или сталей марок 12Х32Н8АЛ, 12Х23Н4Л и др. Как правило, холодильники изготавливают методом литья по выплавляемым моделям либо путём механической обработки из металлической заготовки.

Использование холодильников, изготовленных из сталей с низкой стойкостью против окисления на воздухе при температуре прокаливания КО, приводит к окисле-

нию их поверхности в процессе прокаливания КО и образованию в отливках, в местах контакта с холодильниками, газовых раковин.

В этом случае прокаливание КО проводят в восстановительной среде, либо поверхность холодильника, контактирующую с металлом отливки, защищают специальными покрытиями. В качестве покрытий используют высокотемпературные эмали,  $Al_2O_3$  или  $SiO_2$ . Покрытия из  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$  на поверхность стальных холодильников наносят методом газотермического (плазменного) напыления. Толщина защитных покрытий, как правило, составляет 0,2...0,5 мм.

Для отливок из алюминиевых или магниевых сплавов холодильники предпочтительнее изготавливать из латуни. Причём масса латунного холодильника должна быть не меньше массы металла в термическом узле отливки, на который устанавливается холодильник.

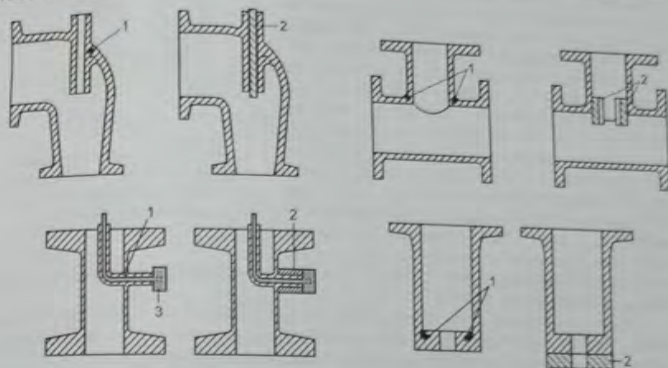


Рис. 3.81. Схемы расположения рыхолт (1) в термических узлах отливок и схемы установки холодильников (2) на термические узлы отливок (3 – керамический стержень)

**Способы установки холодильников.** Холодильники устанавливают в КО после выплавления из неё модельного состава или крепят на термический узел модели отливки, до нанесения на неё огнеупорного покрытия [229, 238].

**Крепление холодильников в КО.** На рис. 3.82 представлена схема установки холодильника 7 непосредственно в КО 5, на бобышку 2, расположенную на стенке модели отливки 1.

Данный способ предполагает выполнение на модели бобышки 2, знака 3 под холодильник (см. рис. 3.82, а). Профиль знака и его высота соответствуют профилю и толщине соответствующего холодильника. В процессе нанесения огнеупорного покрытия на модель с торцевой

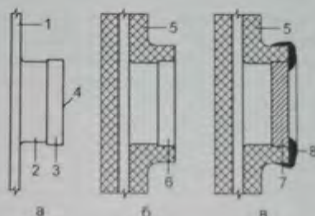


Рис. 3.82. Схема установки холодильника в КО



поверхности знака 4 постоянно механически удаляют (счищают) огнеупорную суспензию. По завершении изготовления КО 5 и выплавления из неё модельного состава (см. рис. 3.82,б), в образовавшуюся полость 6 вставляют соответствующий холодильничек. Закрепляют холодильничек 7 в КО путем его обмазки с внешней стороны огнеупорной пастой 8, что схематично представлено на рис. 3.82,в.

Крепление холодильничка на восковую модель осуществляют путем его припаивания к модели или в результате запрессовки модельного состава в пресс-форму.

Припаивание холодильничков к модели отливки осуществляют с использованием специальных легкоплавких воскоподобных сплавов, до или в процессе монтажа ЛПС. На рис. 3.83 представлен разрез фрагмента стенки модели отливки 1 с установленным на неё методом припаивания сегментным холодильничком 2. На поверхности модельного холодильничка удерживается за счёт наплавки на его внешнюю поверхность по периметру пайки 3, наружу легкоплавкого воскоподобного сплава 4, например, модельного состава Недостатком данного способа крепления является невысокая прочность соединения модели и холодильничка, что зачастую является причиной отламывания холодильничков от модели отливки в процессе манипуляций с модельным блоком. Кроме того, при удалении холодильничков с поверхности отливки 5 (см. рис. 3.83,б) возникают определенные сложности, вызванные необходимостью удаления металлического облоя 4, образующегося по периметру холодильничка в местах его припаивания к модели.

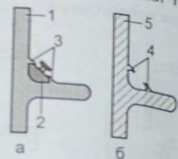


Рис. 3.83. Крепление холодильничка к модели пайкой (а) и вид узла отливки после удаления с его поверхности холодильничка (б)

В ряде случаев удаление облоя с поверхности отливки невозможно или нежелательно. Поэтому установку холодильничка на модель отливки целесообразно проводить в пресс-форме, без изменения конфигурации поверхности модели.

При запрессовке модельного состава в пресс-форму установку холодильничка на восковую модель реализуют следующими способами.

**Способ 1.** В процессе сборки пресс-формы в специально выполненную в ней знаковую часть, по месту установки холодильничка на отливку, устанавливают холодильничек, собирают пресс-форму и запрессовывают модельный состав. При этом холодильничек или его отдельная часть, после запрессовки модельного состава в пресс-форму, оказывается обжатой (обжатой) модельным составом (см. рис. 3.84), что и удерживает его на модели. Таким способом можно устанавливать либо внутренние холодильнички (см. рис. 3.84,а), либо холодильнички, конструкция которых представлена на рис. 3.84,б.

Говоря о холодильничках, конструкция которых подобна холодильничку, представленному на рис. 3.84,б, необходимо отметить, что диаметр и длину стержня холодильничка необходимо подбирать такими, чтобы холодильничек мог не только прочно удерживаться на модели отливки, но и не расплавилась торцевая часть его стержня при охлаждении расплава отливки, залитого в КО.

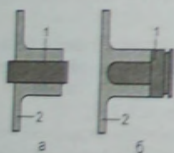


Рис. 3.84. Схема расположения внутреннего холодильничка в модели: 1 — холодильничек; 2 — модель отливки.

**Способ 2.** Данный способ разработан автором и ориентирован на высокоточную установку холодильничков любой конфигурации на модель в пресс-форме (см. рис. 3.85). Согласно данному способу на поверхность холодильничка 1, контактирующую с отливкой, наносят слой клея толщиной 0,1...0,3 мм и присыпают его гранулами (диаметром от 0,5 до 1,5 мм) вещества 2 органического происхождения (см. рис. 3.85,а).

После отверждения клея холодильничек помещают в соответствующую знаковую часть в пресс-форме, собирают пресс-форму и запрессовывают в неё модельный состав. Охлажденную модель извлекают вместе с холодильничком из пресс-формы и проводят с ней последующие технологические операции (контроль качества, удаление облоя и т.п.).

Прочность соединения модели 3 и холодильничка 1 в этом способе осуществляется за счёт "вмораживания" в модельный состав гранул органического вещества 2, приклеенных к поверхности холодильничка (см. рис. 3.85,б). После выплавления модельного состава из КО гранулы и клей остаются на поверхности холодильничка 1 происходит при прокаливании КО 4 (см. рис. 3.85,г).

Для реализации данного способа в качестве гранулированного вещества можно использовать, например, гранулированный карбамид (мочевину), бисерный полистирол, гранулированные полимеры и сополимеры и т.п. В качестве клеящего вещества следует использовать клей органического происхождения, предназначенный для склеивания металлов с пластмассами (клеи марок БФ-2, БФ-4, ВК-5, МПФ-1 и т.п.) Основным требованием к используемому гранулированному веществу и клею — их полное удаление с поверхности холодильничка в процессе прокалывания КО.

Прочность соединения холодильничка и модели по данному способу зависит от ряда параметров и свойств используемых материалов. Например, при использовании стального холодильничка, клея марки БФ-2, бисерного полистирола и модельного состава КС-5Р или Р-3 наибольшая прочность соединения достигается при использовании гранул бисерного полистирола с диаметром 1,1...1,25 мм. При этом предел прочности соединения при статическом изгибе, при 18...20°C, достигает 0,8...0,95 абсолютного значения аналогичного параметра модельного состава, используемого для изготовления модели отливки.

**Расчёт холодильничков.** Все холодильнички по конфигурационному признаку можно разделить на четыре группы: пластинчатые, сегментные, трубчатые и цилиндрические (внутренние).

**Пластинчатые холодильнички.** Область применения — бобышки, приливы, фланцы, Т- и L-образные сечения отливок, что схематично представлено на рис. 3.86 (на схемах стрелками обозначены направления поступления расплава для питания затвердевающего термического узла через стенки отливки).

Эффективная работа пластинчатого холодильничка обеспечивается при выполнении условия:

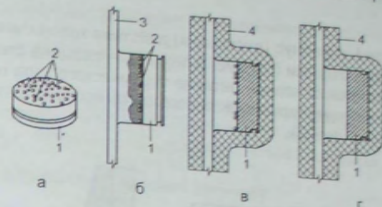


Рис. 3.85. Схема этапов установки холодильничка в КО



Трубчатые холодильники. Область применения – протяженные цилиндрические бобышки, фланцы отливки, что схематично представлено на рис. 3.88. Возможность применения трубчатых стальных холодильников определяют из соотношения:

$$1,48\delta < (D-D_0) < 4,5\delta, \quad (3.58)$$

где  $D$  и  $D_0$  – внутренний диаметр холодильника и термического узла соответственно, м.

На термический узел, для которого выполняется условие  $(D-D_0) < 1,48\delta$ , нет необходимости устанавливать холодильник. На термический узел, у которого  $(D-D_0) \geq 4,5\delta$ , следует установить прибыль.

Внешний диаметр трубчатых холодильников рассчитывают по уравнению:

$$D_T = 1,7D - 0,8D_0. \quad (3.59)$$

Цилиндрические холодильники (внутренние). Область применения – полые бобышки, короткие патрубки и т.п., что схематично представлено на рис. 3.89.

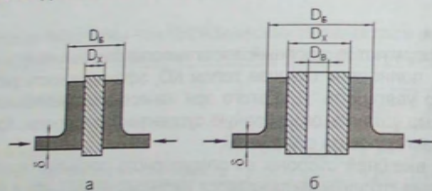


Рис. 3.89. Схема к расчету цилиндрических холодильников

Как правило, внутренние холодильники являются одноразовыми. Одноразовое использование холодильников данной группы связано со сложностью их удаления из отливки. Без принятия специальных мер, обжатие холодильников затвердевшим металлом отливки вызывает необходимость их последующего удаления из отливки механической обработкой.

Для обеспечения извлечения внутреннего цилиндрического холодильника из отливки необходимо его внешнюю поверхность выполнить конусной, например, с углом  $30^\circ$ , и покрыть тонким слоем двуокиси алюминия, например, методом газотермического напыления. При этом установку холодильника в узел отливки следует выполнять таким образом, чтобы диаметр холодильника увеличивался в направлении его последующего извлечения из отливки.

Наряду с вышеизложенным, для успешного применения цилиндрических холодильников существует дополнительный ряд требований, а именно:

- материал холодильника должен иметь невысокую твердость (в случае удаления холодильника механическим способом);
- диаметр холодильника не должен быть слишком мал, во избежание расплавления холодильника при нагреве от затвердевающего расплава отливки;

- материал отливки должен обладать низкой склонностью к образованию трещин в литом состоянии.

Целесообразность использования цилиндрических (сплошных и полых) холодильников оценивают по зависимости, представленной на рис. 3.90. Для этого предварительно рассчитывают величину отношения диаметра бобышки  $D_б$  и разности  $D_б - D_х$ . По зависимости (см. рис. 3.90) определяют предельно-допустимое значение отношения  $0,5(D_б - D_х)/\delta$ , проводя вертикаль от полученного числового значения соотношения  $D_б/(D_б - D_х)$  на соответствующей шкале номограммы до кривой на номограмме и от кривой влево по горизонтали. Если полученное значение  $0,5(D_б - D_х)/\delta$ , по номограмме, меньше рассчитанного по чертежу узла отливки, то на данную бобышку можно установить стальной холодильник. В противном случае на бобышку следует установить прибыль.

Экспериментально установлено, что при получении отливок из сталей и никелевых сплавов в КО, нагретые до  $950...980^\circ\text{C}$ , расплавления стального холодильника не происходит при выполнении условия:

$$\frac{D_б}{D_х} < 3,5, \quad (3.60)$$

где  $D_б$  – внешний диаметр бобышки, м;  $D_х$  – внешний диаметр холодильника, м.

В случае невыполнения условия (3.60) рекомендуется отверстие в бобышке не выполнять и установить на неё прибыль.

В том случае, если  $D_б/D_х > 1,71$ , с целью снижения массы, холодильник следует выполнять полым. При этом диаметр полого холодильника рекомендуется рассчитывать по уравнению:

$$D_в = \sqrt{1,5 \cdot D_х - 0,5 \cdot D_б}. \quad (3.61)$$

Использование внутренних холодильников связано с вопросом затруднённой усадки металла в тепловом узле отливки. Для ряда марок сплавов применение внутренних металлических холодильников практически невозможно из-за образования трещин в металле термических узлов отливок.

Одним из критериев оценки склонности сплавов к образованию трещин является величина их ударной вязкости в литом нетермообработанном состоянии. Практика получения литых свидельствует, что, например, для сталей с величиной ударной вязкости в литом состоянии, при  $20^\circ\text{C}$ , менее  $0,25 \text{ МДж/м}^2$  получение годных отливок со стальными внутренними холодильниками становится проблематичным.

С этой точки зрения, для отливок из нержавеющей сталей целесообразность использования внутренних стальных холодильников можно оценить по структурной диаграмме Шеффлера, представленной на рис. 1.4.

**Пример 3.10.** Определить целесообразность установки цилиндрического стального холодильника в полую бобышку (см. рис. 3.89) с внешним диаметром  $D_б = 30 \text{ мм}$  и внутренним диаметром  $D_х = 14 \text{ мм}$ , если бобышка выполнена на стенке отливки толщиной  $\delta = 10 \text{ мм}$ . Материал отливки – сталь 08X14H7MJ.

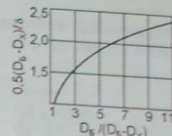


Рис. 3.90. Номограмма для определения целесообразности использования цилиндрических стальных холодильников



Для решения поставленной задачи, прежде всего рассчитываем значения величин

$$\frac{0,5 \cdot (D_B - D_X)}{\delta} = \frac{0,5 \cdot (30 - 14)}{8} = 1;$$

$$\frac{D_B}{D_B - D_X} = \frac{30}{30 - 14} = 1,875.$$

Используя номограмму, представленную на рис. 3.90, находим, что при соотношении  $D_B/(D_B - D_X) = 1,875$  предельная величина соотношения  $0,5 \cdot (D_B - D_X)/\delta$  равна 1,2.

Поскольку рассчитанное по чертежу отливки значение величины  $0,5 \cdot (D_B - D_X)/\delta$  составляет 1,0 и, соответственно, меньше предельного значения 1,2, определённого по номограмме, то на данную бобышку можно установить внутренний стальной холодильник.

Поскольку  $D_B/D_X = 30/14 = 2,14 < 3,5$ , то, согласно условию (3.60), данный холодильник не будет оплавлен затитом в форму расплавом.

Для оценки вероятности образования трещин в бобышке отливки при установке в неё внутреннего холодильника рассчитаем эквивалент никеля и хрома стали 08Х14Н7МП.

эквивалент никеля

$$Ni_3 = Ni + 20 \cdot C + 0,1 \cdot Mn + 12 \cdot N = 7 + 20 \cdot 0,08 + 0,1 \cdot 0,07 + 12 \cdot 0,001 = 8,6;$$

эквивалент хрома

$$Cr_3 = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb + 4 \cdot Ti + 3,5 \cdot Al = 14 + 0,9 + 1,5 \cdot 0,06 + 0,5 \cdot 0 + 4 \cdot 0 + 3,5 \cdot 0 = 15.$$

Согласно структурной диаграмме Шеффлера (см. рис. 1.4) хромоникелевая нержавеющая сталь, с величиной эквивалентов  $Ni_3 = 8,6$  и  $Cr_3 = 15$ , в литом нетермообработанном состоянии характеризуется величиной ударной вязкости, равной  $0,3 \dots 0,6$  МДж/м<sup>2</sup>, что превышает минимальнодопустимое значение  $0,25$  МДж/м<sup>2</sup>. То есть вероятность образования трещин в бобышке при использовании внутреннего стального холодильника невелика.

Поскольку  $D_B/D_X = 30/14 = 2,14 > 1,71$ , то данный холодильник можно выполнить полым, с внутренним диаметром.

$$D_B = \sqrt{1,5 \cdot D_X - 0,5 \cdot D_E} = \sqrt{1,5 \cdot 14 - 0,5 \cdot 30} = 2,45 \text{ мм.}$$

В связи с тем, что величина  $D_B$  достаточно мала, то использование полого стального холодильника вместо цилиндрического, в данном случае, нецелесообразно. Таким образом, в рассмотренном случае в бобышку можно установить внутренний стальной холодильник с внешним диаметром 14 мм.

**Холодильники наружные неохлаждаемые малой массы.** В отличие от холодильников, контактирующих непосредственно с отливкой, наружные холодильники отделены от отливки стенкой КО, что схематично представлено на рис. 3.91.

С одной стороны, наличие стенки КО между холодильником и отливкой позволяет получать термический узел отливки с высокой чистотой поверхности и размерной точностью. В то же время наличие тела КО между холодильником и отливкой резко

понижает интенсивность теплоотдачи от затвердевающей отливки в холодильник, и, соответственно, понижает эффективность его работы.

Наружные неохлаждаемые холодильники в отечественной практике литья по выплавляемым моделям практически не используются. Это связано с низкой эф-

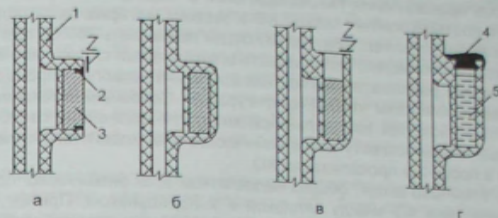


Рис. 3.91. Холодильник внешний неохлаждаемый (Z – поверхность очистки от огнеупорной суспензии в процессе изготовления КО)

фективностью таких схем использования холодильников и сложностью установки холодильника на термический узел отливки.

Для установки холодильника 3 по схеме, представленной на рис. 3.91,а, на модельный блок наносят 4...5 слоёв огнеупорного покрытия, после чего к КО, оформляющей торцевую часть бобышки, крепят (припаивают) плашку, имеющую форму холодильника 3 и изготовленную из модельного состава. В процессе последующего нанесения огнеупорного покрытия на модельный блок с торцевой поверхности плашки (Z) регулярно удаляют огнеупорную суспензию. После выплавки из КО модельного состава в образовавшуюся полость КО 1 вводят стальной холодильник 3, который закрепляют в теле КО с помощью самотвердеющей огнеупорной пасты 2.

При установке по схеме, представленной на рис. 3.91,б, холодильник после нанесения на модельный блок 4...5 слоёв огнеупорного покрытия методом пайки модельным составом крепят к бобышке, после чего на модельный блок продолжают наносить оставшиеся слои огнеупорного покрытия.

Существенным недостатком вышеописанного способа крепления холодильника на тело КО является сложность надёжного закрепления холодильника на блоке. Дело в том, что, имея относительно большую массу, холодильники зачастую оттаиваются от блока до окончания нанесения на него всех слоёв огнеупорного покрытия.

На рис. 3.91,в представлена схема крепления холодильника с использованием "кармана" в теле КО, выполненного на торцевой части бобышки. Как и в случае схемы, представленной на рис. 3.91,а, "карман" в теле КО выполняют по аналогичной технологии, а холодильник вводят в "карман" после выплавки из КО модельного состава, непосредственно перед формовкой КО в опорный наполнитель или установкой КО в прокаточную печь.

Основным недостатком вышеописанных способов установки внешних холодильников на термический узел отливки является отсутствие плотного контакта между холодильником и КО, что резко понижает эффективность его работы.

С целью устранения газового зазора между холодильником и поверхностью КО можно использовать холодильник, материал которого имеет температуру плавления более низкую, чем начальная температура КО перед заливкой. В этом случае (см. рис. 3.91,г), после выплавки модельного состава из КО и до её прокаливания, в "карман" КО вводят холодильник и заполняют свободную часть полости "кармана"



самовтердеющей огнеупорной пастой 4. "Герметизация" полости "кармана" КО с холодильником не только предохраняет материал холодильника от окисления в процессе прокаливания КО, но и обеспечивает сохранность расплава холодильника 5 в "кармане" при транспортировке КО после прокаливания под заливку.

В процессе прокаливания КО холодильник в "кармане" КО расплавляется, что обеспечивает плотный контакт между КО и жидким материалом холодильника. Например, если до заливки температура КО будет превышать  $750^{\circ}\text{C}$ , то в качестве материала холодильника можно использовать алюминиевые сплавы или алюминий.

Использование расплавляющегося холодильника позволяет проводить его установку на термические узлы любой конфигурации. Основным ограничением использования расплавляющихся холодильников являются химические свойства его материала, который не должен вступать в химическое взаимодействие с материалом КО и окисляться в процессе прокаливания КО.

Как было отмечено выше, общим недостатком всех внешних холодильников является наличие тела КО между отливкой и холодильником. Причём, чем больше является толщина этого тела, тем ниже эффективность применяемого холодильника. Практика использования внешних холодильников свидетельствует, что, если толщина тела КО между холодильником и телом отливки составляет более  $0,5...0,8$  толщины стенки термического узла отливки, эффективность внешнего холодильника практически равна нулю.

**Холодильники наружные большой массы.** Как правило, холодильники наружные большой массы используют при получении толстостенных отливок, имеющих ЛПС типа VI. При этом наружные холодильники используют не только для повышения направленности теплоотвода от затвердевающей отливки, но и в качестве опоры для КО. Следует отметить, что использование массивного наружного холодильника эффективно только при условии формовки КО в опорный наполнитель.

С целью повышения эффективности работы наружного массивного холодильника донную часть КО контактирующую с холодильником, предварительно выравнивают, притирая её поверхность на абразивном круге. Причём притирке на абразивном круге подвергают только толстостенные КО, обладающие достаточно высокой прочностью, например КО, изготовленные на основе белого электрокорунда.

Эффективность работы наружного холодильника зависит от ряда параметров. При всех прочих равных условиях, эффективность работы наружного холодильника тем выше, чем:

- меньше толщина стенки КО, разделяющей отливку и холодильник;
- больше толщина стенки отливки, через которую обеспечивается питание термического узла;
- ниже начальная температура холодильника;
- выше теплопроводность материала КО и т.п.

Существует несколько вариантов использования внешних холодильников, которые отличаются двумя признаками – начальной температурой холодильника и КО, а также способом охлаждения самого холодильника.

К моменту начала заливки КО расплавом температура наружного холодильника может быть ниже начальной температуры КО или равной ей. Кроме того, наружный холодильник может быть неохлаждаемым и охлаждаемым. Рассмотрим данные варианты использования наружных холодильников большой массы.

Вариант I – неохлаждаемый холодильник имеет к моменту заливки формы температуру, равную температуре КО. То есть после формовки КО в опоку на холодильник и в опорный наполнитель КО нагревают и прокаливают вместе с холодильником.

Данный вариант применения массивного холодильника используют при получении толстостенных отливок для усиления эффекта последовательности затвердевания отливки. При этом толщина тела отливки, контактирующей с холодильником через КО, должна быть не менее  $2...2,5$  толщин стенки КО. В противном случае используемый холодильник будет выполнять лишь роль подставки для КО.

Толщина холодильника в данном случае должна быть не меньше толщины стенки отливки. Как правило, толщина применяемых наружных массивных холодильников составляет от 40 до 70 мм. Схема формовки КО на неохлаждаемый массивный наружный холодильник представлена на рис. 3.92 а.

Вариант II – неохлаждаемый холодильник имеет к моменту заливки формы температуру более низкую, чем температура КО. Данный вариант применения холодильников практически не используется в связи с техническими сложностями его реализации.

Вариант III – принудительно охлаждаемый холодильник имеет к моменту заливки формы температуру, равную температуре КО. Этот вариант применения холодильников, как и предыдущий, практически не используется, поскольку характеризуется относительно невысокой эффективностью.

Вариант IV – принудительно охлаждаемый холодильник (см. рис. 3.92 б) имеет к моменту заливки формы температуру более низкую, чем средняя температура КО. Данный вариант применения наружных массивных холодильников, из числа вышеописанных, наиболее эффективен.

Примером успешного использования принудительно охлаждаемого массивного наружного холодильника является технология подготовки формы к заливке отливки роторного типа из жаропрочного никелевого сплава.

Согласно принятой в цехе технологии заливку отливки роторного типа осуществляли в вакуумной, индукционной плавильно-заливочной установке.

Для формовки предварительно притёртую на абразивном круге, двенадцатислойную электрокорундовую КО устанавливали на стальной холодильник, помещённый в опоку (толщина холодильника ~50 мм). После этого пространство между опокой и КО заполняли крошкой боя КО, а в области ЛЧ выполняли электрокорундово-жидкостеклянную пробку, что схематично представлено на рис. 3.93 а. Схема подготовки формы к заливке предполагала нагрев формы до  $940...950^{\circ}\text{C}$  в камерной электропечи с подогреваемым подом, извлечение формы из печи, установку формы на песчаный плац вакуумной печи (см. рис. 3.93 а), подачу формы в вакуумную печь, создание вакуума в печи, плавку и заливку формы металлом. Длительность охлаждения формы с момента её выгрузки из прокалочной печи до заливки металлом составляла  $35...40$  мин.

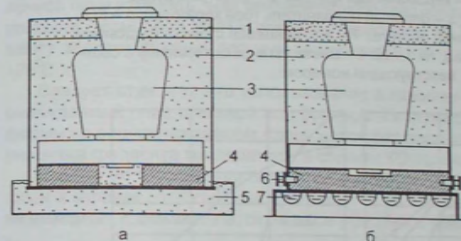


Рис. 3.92. Схема использования наружного, массивного неохлаждаемого (а) и охлаждаемого (б) холодильника: 1 – слой песчано-жидкостеклянной смеси; 2 – опорный наполнитель; 3 – КО; 4 – холодильник; 5 – песчаный заливочный плац; 6 – крепежный палец обечайки опоки и холодильника; 7 – водоохлаждаемый заливочный плац

рундовую КО устанавливали на стальной холодильник, помещённый в опоку (толщина холодильника ~50 мм). После этого пространство между опокой и КО заполняли крошкой боя КО, а в области ЛЧ выполняли электрокорундово-жидкостеклянную пробку, что схематично представлено на рис. 3.93 а. Схема подготовки формы к заливке предполагала нагрев формы до  $940...950^{\circ}\text{C}$  в камерной электропечи с подогреваемым подом, извлечение формы из печи, установку формы на песчаный плац вакуумной печи (см. рис. 3.93 а), подачу формы в вакуумную печь, создание вакуума в печи, плавку и заливку формы металлом. Длительность охлаждения формы с момента её выгрузки из прокалочной печи до заливки металлом составляла  $35...40$  мин.



Анализ качества получаемых отливок свидетельствовал, что от 40 до 70% получаемых по данной технологии отливок, были поражены горячими трещинами в области выходящих кромок лопаток отливок.

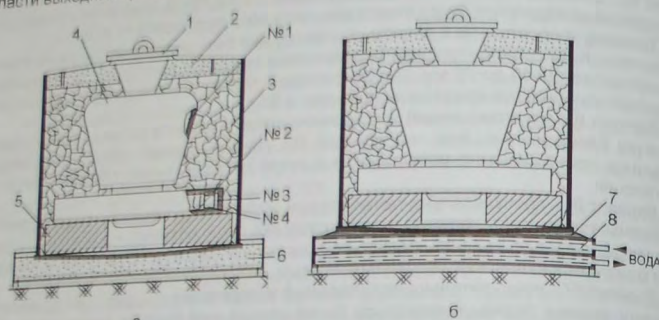


Рис. 3.93. Схема установки форм под заливку на песчаный (а) и водоохлаждаемый (б) плац: 1 – керамическая крышка, 2 – электрокорундожидкостекляная пробка; 3 – опорный наполнитель (бой керамики); 4 – КО; 5 – холодильник, 6 – песчаная постель; 7 – алюминиевая стружка (подсыпка); 8 – водоохлаждаемый плац; № 1...№ 4 – места установки термопар с соответствующим номером

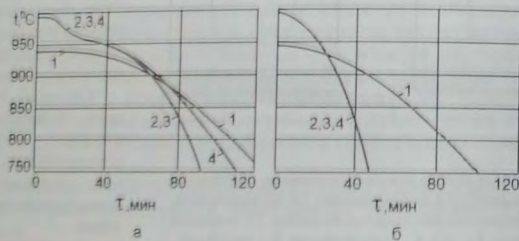


Рис. 3.94. Термограммы охлаждения КО на песчаном (а) и водоохлаждаемом плацу (б)

В результате исследований, проведенных автором совместно с Е.А. Сошниковым, установлено, что к моменту извлечения формы из печи под заливку её температурное поле характеризуется значительной неоднородностью и отрицательным температурным градиентом по высоте КО. Это явление вызвано тем, что нагрев формы под заливку проводили в электропечи камерного типа с подогреваемым подом, температура которого на 40...60°C превышала среднюю температуру в рабочем пространстве печи.

В результате этой конструктивной особенности прокалочной печи к моменту заливки температура стенок КО, в области прибыли была на -50°C ниже, чем температура стенок КО в области отливки. В процессе технологической выдержки формы

до заливки в вакуумной плавильно-заливочной печи, на песчаной постели (35...40 мин), величина отрицательного температурного градиента в стенках КО между прибылью и отливкой несколько уменьшается, о чём свидетельствует ход термограмм, представленных на рис.3.94,а (места установки термопар № 1...№ 4 см. на рис. 3.93,а).

С целью создания положительного температурного градиента по высоте КО к моменту её заливки применили следующую схему подготовки формы к заливке. После извлечения из прокалочной печи, форму устанавливали на водоохлаждаемый плац и выдерживали на нём в течение 15 мин. По истечении указанного времени форму переносили и устанавливали на песчаную постель, на которой её подавали в вакуумную печь, где до заливки, в вакууме, форма охлаждалась ещё 25...30 мин.

Для повышения интенсивности теплоотдачи от дна опоки к водоохлаждаемому плацу на его поверхность предварительно насыпали слой мелкой алюминиевой стружки, что схематично представлено на рис. 3.93,б. Толщина слоя стружки под дном опоки изменялась от 10...15 мм у краёв дна до 3...4 мм в его центре, что было обусловлено изначальным короблением дна опоки используемой опоки.

Термографирование заформованной КО, охлаждающейся до заливки 15 мин на водоохлаждаемом плацу и 30 мин на песчаном плацу в вакуумной плавильно-заливочной установке, показало (см. рис. 3.94,б), что принудительное охлаждение дна опоки в течение 15 мин позволило не только существенно понизить температуру массивного холодильника, но и к ~25-й минуте нахождения формы вне прокалочной печи изменить знак температурного градиента между стенками КО в области прибыли (термопара № 1) и отливки (термопары № 2...№ 4), а к 40-й минуте (к моменту заливки формы) достичь положительного градиента температур величиной ~75°C.

Следует отметить, что использование в качестве подсыпки под форму на водоохлаждаемом плацу стальной или бронзовой стружки, или осуществление выдержки формы на водоохлаждаемом плацу вовсе без подсыпки, позволяло достичь изменения знака градиента температуры в стенках КО только к 35...45 минуте.

Внедрение в производство вышеописанной технологической схемы подготовки форм к заливке позволило на предприятии полностью исключить брак по трещинам на выходных кромках лопаток отливок роторного типа.

### 3.7. Расчёт сечений литников и параметров заливки форм с литниково-питающими системами типа V-VIII

Поскольку, в литье по выплавляемым моделям, подавляющее число отливок получают в формы, начальная температура которых значительно меньше температуры заливаемого в них расплава, то немаловажными факторами в обеспечении полного заполнения рабочих полостей формы являются показатели жидкотекучести и заполняемости используемых металлов и сплавов.

Жидкотекучесть – способность расплава заполнять каналы формы. При всех прочих равных условиях, жидкотекучесть сплавов, прежде всего зависит от величины их температурного интервала кристаллизации и количества в них Н.В. Чем меньше температурный интервал кристаллизации заливаемого сплава и меньше содержание в расплаве Н.В., тем выше жидкотекучесть сплава. То есть, с этой точки зрения, при всех прочих равных условиях, наибольшей жидкотекучестью обладают чистые металлы и эвтектические сплавы [16; 123 и др.].

Заполняемость характеризует способность металлов и сплавов чётко воспроизводить контуры рабочих полостей формы и, в основном, зависит от величины поверхностного натяжения заливаемого в форму расплава и смачивания расплавом



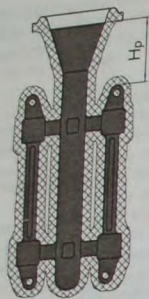


Рис. 3.95. Схема к определению металлостатического напора в КО (форме)

рабочих поверхностей формы. Чем ниже величина поверхностного натяжения расплава и выше его смачиваемость поверхностью рабочей полости формы, тем лучше заполняемость формы расплавом.

В условиях плохой смачиваемости или отсутствия смачиваемости расплавом поверхностей рабочей полости формы задачу по заполняемости рабочих полостей формы берёт на себя литниковая система отливки.

Как было отмечено выше, литниковая система, прежде всего, должна обеспечить условия для полного заполнения формы расплавом. Для заполнения наиболее "проблемными" являются тонкие и протяжённые стенки отливки, а также их тонкие кромки и углы (узкие полости в форме).

Для обеспечения заполнения расплавом узких полостей в КО (форме) необходимо, прежде всего, создать определённый металлостатический напор ( $H_p$ ) над заполняемым сечением КО (см. рис. 3.95). Для отливки с толщиной стенок менее 5 мм, когда при отсутствии смачивания расплавом поверхности КО (формы) значительное "противодействие" заполнению узких полостей КО (формы) оказывает сила поверхностного натяжения расплава, металлостатического напора рассчитывают по формуле

$$H_p = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos Q}{\delta \cdot \rho_1 \cdot g}, \quad (3.62)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение расплава, Н/м;  $Q$  – угол смачивания стенок КО (формы) расплавом, рад;  $\delta$  – толщина тонкой стенки отливки (канала формы), м;  $\rho_1$  – плотность жидкого металла, кг/м<sup>3</sup>;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

Для сравнения, в табл. 3.24 приведена величина минимально допустимого металлостатического напора некоторых металлов и сплавов, необходимого для заполнения стенки отливки толщиной 1 мм при  $Q \approx 3,14$  рад ( $180^\circ$ ), рассчитанного по формуле (3.62).

Величина металлостатического напора, рассчитанная по формуле (3.62), не всегда отвечает реальным условиям заливки. Например, согласно расчету по формуле (3.62), для обеспечения заполнения стенки отливки толщиной 1 мм жидким алюминием при  $750^\circ\text{C}$  требуется металлостатический напор

$H_p \approx 6,7$  см. Тем не менее, такого металлостатического напора в реальных условиях получения отливок, оказывается недостаточно.

Дело в том, что на поверхности потока расплава жидкого алюминия в рабочих полостях формы, при его заливке в окислительной среде, всегда присутствует довольно прочная и плотная окисная пленка. Образование окисной пленки на свободной поверхности головной части потока расплава алюминия, движущегося в каналах формы, происходит настолько быстро, что это движение можно рассматривать как движение жидкости в "чужке", состоящем из окислов алюминия.

Наличие плотного слоя окислов в головной части потока расплава в форме, в свою очередь, понижает жидкотекучесть металла. Кроме того, течение расплава в каналах КО (формы) сопровождается интенсивным теплоотводом от потока расплава в стенки КО (формы), что приводит не только к снижению температуры потока расплава и повышению его вязкости, но и способствует понижению его жидкотекучести. Поэтому для заливки тонкостенных отливок из пленообразующих сплавов требуется обеспечить значительно больший металлостатический напор.

Данные, полученные в результате расчёта  $H_p$  по формуле (3.62), могут быть использованы при изготовлении отливок методом направленной кристаллизации, где температура заливаемого расплава и начальная температура КО практически одинаковы, а заливка и кристаллизация расплава проходит в условиях вакуума.

Для обычных условий изготовления отливок, при проектировании ЛПС рекомендуется принимать для сталей чугунов, никелевых, кобальтовых и медных сплавов,  $H_p \geq 0,07$  м, для алюминиевых сплавов –  $H_p \geq 0,21$  м [153], для магниевых сплавов –  $H_p \geq 0,125 \dots 0,15$  м [62].

Помимо величины металлостатического напора, для получения качественного литья не менее важным параметром является длительность заливки КО или удельная (массовая) скорость поступления расплава в форму. Дело в том, что, как было отмечено выше, если температура КО до заливки ниже температуры заливаемого сплава, то в процессе течения в каналах КО расплав теряет теплоту перегрева. По мере продвижения по каналам КО поток расплава может настолько охладиться, что его неуклонно повышающаяся вязкость, вызванная понижением температуры, не позволит получить отливку с требуемым качеством поверхности либо произойдёт недолив КО. В связи с этим необходимо проектировать такую ЛПС, которая, помимо всех прочего, обеспечила бы оптимальную длительность заполнения КО при минимальных потерях температуры расплава.

Как было отмечено выше, в связи с недостаточно высокой прочностью используемых модельных составов площади поперечных сечений элементов литниковой системы имеют повышенные значения. Поэтому в отсутствие в литниковых системах элементов, регулирующих расход металла, практически все литниковые системы являются незамкнутыми. То есть скорость поступления расплава в форму во время заливки регулируется заливщиком и определяется скоростью истечения расплава из ковша или тигля плавильной печи (в случае заливки КО из порционной печи). В этих случаях наиболее важной характеристикой, определяющей процесс заливки формы, становится не площадь поперечных сечений элементов литниковой системы, а длительность заливки и равномерность поступления расплава в КО.

Если длительность заливки формы велика, то скорость повышения уровня расплава в КО небольшая, в связи с чем повышается вероятность образования в отливке недоливов, спаев, усадочных раковин в месте подвода расплава в отливку, усадочной пористости и т.п. Если длительность заливки формы невелика, то скорость повышения уровня расплава в КО высокая. При этом возрастает опасность образования в отливке корольков, разрушения лицевого слоя КО, поломки керамического стержня под воздействием динамического удара струи расплава и т.п. То

Таблица 3.24

**Величина минимально допустимого металлостатического напора некоторых металлов и сплавов, необходимого для заполнения стенки отливки толщиной 1 мм, в условиях полного отсутствия смачивания расплавом стенок формы**

Металл, сплав	$\sigma$ , Н/м	$\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	$H_p$ , м
Армико-железо	1,58	7000	0,046
Сталь 45Л	1,50	7000	0,043
Чугун (СЧ)	1,10	7000	0,032
Чугун (ВЧ)	1,38	7000	0,040
Со	1,84	7740	0,048
Ni	1,80	7860	0,047
Cu	1,10	8340	0,027
Al	0,81	2450	0,067
Mg	0,57	1550	0,075



ности заливки сталей и чугунов в КО, изготовленные на основе этилсиликата и кварцевого песка, с начальной температурой 900...980°C можно также использовать эмпирическую зависимость, полученную автором:

есть, для каждой отливки, конструкции ЛПС, условной заливки и типа сплава существует оптимальная скорость заливки (КО) формы.  
В работе [153] удельную скорость заливки стали в КО рекомендуют вычислять по эмпирической формуле (кг/с):

$$Q_{\text{зал}} = \frac{k \cdot l}{\delta}, \quad (3.63)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности ( $k = 0,05$  при верхнем подводе металла в отливку,  $k = 0,06$  при подводе металла сбоку,  $k = 0,08$  при подводе металла снизу);  $\delta$  и  $l$  – толщина и наибольшая протяжённость тонкой стенки (кромки отливки) соответственно, мм.

Зная металлоёмкость заливаемой КО ( $M_{\text{МФ}}$ ), несложно рассчитать общее время заливки данной КО расплавом, используя уравнение (3.63):

$$\tau_{\text{зал}} = \frac{M_{\text{МФ}}}{Q_{\text{зал}}} = \frac{M_{\text{МФ}} \cdot \delta}{k \cdot l}. \quad (3.64)$$

Если отливка имеет толщину стенки более 5 мм, то продолжительность заливки можно рассчитать по формуле [153]:

$$\tau_{\text{зал}} = \left[ \frac{\pi \cdot V_0 \cdot \rho_1^1 \cdot c_1^1 \cdot (t_{\text{зал.Н}} - t_{\text{зал.К}})}{S_0 \cdot b_0 \cdot (t_{\text{зал.Н}} - t_2)} \right]^2,$$

где  $\rho_1^1$  – плотность расплава, кг/м<sup>3</sup>;  $c_1^1$  – удельная теплоёмкость расплава, Дж/(кг·°C);  $V_0$  – объём отливки, м<sup>3</sup>;  $S_0$  – площадь поверхности отливки, м<sup>2</sup>;  $b_0$  – коэффициент теплоаккумулирующей способности материала КО, Вт·с<sup>0,5</sup>/(м<sup>2</sup>·°C);  $t_2$  – температура КО до начала заливки, °C;  $t_{\text{зал.Н}}$  и  $t_{\text{зал.К}}$  – температура расплава в начале и конце заливки соответственно, °C.

Наиболее часто продолжительность заливки рассчитывают по эмпирической формуле К.А. Соболева, В.А. Беленького:

$$\tau_{\text{зал}} = s \cdot \sqrt{\delta \cdot M_0}, \quad (3.65)$$

Таблица 3.25  
Значения коэффициента  $s$  в уравнении (3.65)

Сплав	$t_2$ , °C	$s$
Сталь низкоуглеродистая	900-980	3,1-4,5
Сталь высоколегированная, хромо- никелевая	900-980	2,4-2,9
Чугун серый	900-980	3,6-5,9
Чугун хромистый	900-980	2,6-3,2
Бронза оловянная	600-750	3,0-4,4
Бронза алюминиевая	600-800	2,1-2,9
Латуни	550-750	2,8-4,3
Алюминиевые сплавы	250-350	1,7-2,8

Примечание. Меньшее значение ( $s$ ) соответствует заполнению отливки снизу (сифоном), большее значение соответствует заполнению отливки сверху.

где  $\delta$  – преобладающая толщина стенки отливки, мм;  $M_0$  – масса отливки, кг;  $s$  – коэффициент пропорциональности.

Значения коэффициента  $s$ , полученные автором, для некоторых сплавов, при их заливке на воздухе в КО, изготовленные на основе кварцевого песка и пылевидного кварца, с начальной температурой  $t_2$ , приведены в табл. 3.25.

Для определения длитель-

ности заливки сталей и чугунов в КО, изготовленные на основе этилсиликата и кварцевого песка, с начальной температурой 900...980°C можно также использовать эмпирическую зависимость, полученную автором:

$$\tau_{\text{зал}} = \frac{M_{\text{МФ}} \cdot l_{\text{AB}}}{D \cdot C \cdot M_{\text{AB}} \cdot \left( A + B \cdot \sqrt{\frac{l_{\text{AB}}}{\delta_{\text{AB}}} \right)}, \quad (3.66)$$

где  $\delta_{\text{AB}}$  и  $l_{\text{AB}}$  – минимальная толщина стенки отливки и её протяжённость сечениями А-А и В-В, мм;  $M_{\text{AB}}$  – масса части отливки и ЛПС между сечениями А-А и В-В, кг; А, В, С, D – коэффициенты (см. табл. 3.26...3.28).

Таблица 3.26  
Значения коэффициентов А и В в уравнении (3.66)

Сплав	А	В
Сталь, склонная к пленкообразованию в жидком состоянии (заливка в окислительной среде)	15	1,5
Сталь, склонная к пленкообразованию в жидком состоянии (заливка в восстановительной среде)	7	1,4
Сталь, не склонная к пленкообразованию в жидком состоянии	0	3,1
Чугун серый	0	2,3

Таблица 3.27  
Значения коэффициента С в уравнении (3.66)

Способ подвода металла в отливку	Нижний (сифонный)	Вертикально-щелевой	Верхний (дождевой)
С	1	0,9	0,7

Таблица 3.28  
Значения коэффициента D в уравнении (3.66)

Способ формовки КО	Газовая среда в КО перед заливкой	D
Без опорного наполнителя	Окислительная	1,2
	Восстановительная	1,0
В опорный наполнитель или термостат	Окислительная	1,05
	Восстановительная	0,85

При использовании уравнения (3.66) расчёт продолжительности заливки КО (формы) проводят по методу наиболее опасного участка (сечения) отливки [220]. Наиболее опасный участок отливки определяют с точки зрения наибольшей вероятности образования на данном участке недоливов, спаев, усадочных рыхлот и (или) окисных плён.

Применение формул (3.65) и (3.66) поясним на следующем примере.

**Пример 3.11.** На рис. 3.96 а представлен модельный блок отливки "Колено". При данной конструкции ЛПС и положении отливки в пространстве во время заливки наиболее опасным участком является часть отливки, находящаяся между горизонтальными сечениями А-А и В-В (см. рис. 3.96, а).

Данный участок отливки нами выделен как наиболее опасный по следующим причинам. Во-первых, несмотря на то, что данная отливка имеет равномерную тол-



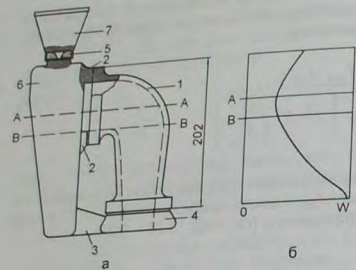


Рис. 3.96. Схема модельного блока отливки "Колено" (а) и зависимость изменения скорости подъёма уровня расплава в форме по высоте отливки, при заливке (б): 1 – отливка; 2 – питатель; 3 – литниковый ход; 4 – нижняя кольцевая прибыль; 5 – дроссель; 6 – боковая прибыль; 7 – литниковая воронка

стину основной стенки, наименьшее значение отношения площади поверхности зеркала расплава, заполняющего КО в процессе заливки, к "смоченному периметру" отливки имеет именно на выделенном нами участке. Во-вторых, при течении расплава в КО во время заливки большая часть выделенного участка отливки "Колено", заполняется сифоном, что повышает вероятность образования поверхностных дефектов на данном участке отливки. В-третьих, именно на выделенном участке скорость повышения уровня расплава в КО – наименьшая (см. рис. 3.96, б).

Рассчитаем продолжительность заливки КО отливки "Колено". В качестве исходных данных принимаем: КО заливают незаформованной в опорный наполнитель, на воздухе (в окислительной среде);

- материал отливки – сталь 12Х18Н10ТЛ;
- начальная температура заливки КО – 950°C;
- температура расплава стали при заливке – 1580°C;
- масса части отливки и литниковой системы, находящейся между сечениями А-А и В-В составляет  $M_{AB}=3,1$  кг;
- масса металла в КО (форме) – 26 кг;
- масса отливки – 7,2 кг;
- минимальная толщина стенки в наиболее опасном поясе (в зоне, расположенной между сечениями А-А и В-В) отливки –  $\delta_{AB}=8$  мм;
- протяжённость стенки –  $l_{AB}=30$  мм (расстояние между горизонтальными сечениями А-А и В-В);
- рассматриваемый участок (опасный пояс) стенки отливки заполняется расплавом снизу (сифоном);
- заливаемая в КО сталь склонна к пленкообразованию в жидком состоянии (наличие в составе стали хрома и титана свидетельствует о её склонности к образованию плён при заливке в КО в окислительной среде).

Используя формулу (3.66) и данные табл. 3.26...3.28, рассчитываем оптимальную продолжительность заливки отливки "Колено", которая составляет:

$$\tau_{3AL} = \frac{M_{MФ} \cdot l_{AB}}{D \cdot C \cdot M_{AB} \cdot \left( A + B \cdot \sqrt{\frac{l_{AB}}{\delta_{AB}}} \right)} = \frac{26 \cdot 30}{1,2 \cdot 1 \cdot 3,1 \cdot \left( 15 + 1,5 \cdot \sqrt{\frac{30}{8}} \right)} = 11,7с.$$

Если для расчёта длительности заливки КО использовать уравнение (3.65), то время заливки составит:

$$\tau_{3AL} = s \cdot \sqrt[3]{\delta \cdot M_0} = 2,4 \cdot \sqrt[3]{8 \cdot 7,2} = 9,3с.$$

Если для расчёта длительности заливки КО использовать уравнение (3.64), то время заливки составит:

$$\tau_{3AL} = \frac{M_{MФ} \cdot \delta}{k \cdot l} = \frac{26 \cdot 8}{0,08 \cdot 202} = 12,9с.$$

Практическое и расчетное значение оптимального времени заливки при получении различных отливок совпадают не всегда и в ряде случаев могут отличаться как в большую, так и в меньшую сторону более чем на 30%. Такая значительная разница объясняется тем, что в реальных условиях литья в формировании качества отливки участвует большое количество факторов, имеющих переменный и зачастую неуправляемый и непредсказуемый характер изменения.

Поэтому, независимо от степени адекватности математических моделей, принятых для расчёта параметров заливки конкретной отливки, все они, как и вышеприведенные, будут давать значения, лишь приближенные к оптимальным. Тем не менее, несомненная ценность таких упрощенных математических моделей состоит в том, что они позволяют с достаточно высокой степенью точности оценить порядок величины  $\tau_{3AL}$ .

Если ЛПС содержит элементы, регулирующие расход жидкого металла, рассчитывают площади проходных сечений этих элементов. Поскольку все жидкие металлы и их сплавы проявляют свойства ньютоновской жидкости, то, согласно законам гидравлики, суженное (регулирующее расход) сечение канала литниковой системы и металлостатический напор связаны известным соотношением (3.6).

В качестве примера рассчитаем площадь сечения калиброванного отверстия в дросселе, который установлен в нижней части литниковой воронки КО отливки "Колено" (см. рис. 3.96).

Согласно вышеприведенному расчёту продолжительность заливки данной отливки составляет 11 с. Для определения площади суженного сечения в дросселе, прежде всего необходимо задаться величиной металлостатического напора  $H_p$  в ЛВ над верхним срезом отверстия в дросселе. Принимаем:  $H_p=0,1$  м. Для расчёта  $f_0$  принимаем  $\mu=0,9$  и  $\rho_l=7000$  кг/м<sup>3</sup>. Величину удельной скорости заливки ( $Q_{3AL}$ ) расплава в форму рассчитываем по формуле (3.64):

$$Q_{3AL} = M_{MФ} / \tau_{3AL} = 26/11 = 2,36 \text{ кг/с.} \quad (3.67)$$

Полученное значение  $Q_{3AL}$  подставляем в формулу (3.6) и рассчитываем величину площади суженного сечения ЛПС (отверстия в дросселе):

$$f_0 = \frac{Q_{3AL}}{\mu \cdot \rho_l \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_p}} = \frac{2,36}{0,9 \cdot 7000 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,1}} = 0,0002674 \text{ м}^2.$$

Исходя из того, что суженное сечение ЛПС имеет форму окружности, рассчитываем диаметр отверстия в дросселе:

$$D_{CC} = (2 \cdot f_0 / \pi)^{1/2} = (2 \cdot 0,0002674 / 3,14)^{1/2} = 0,013 \text{ м.}$$







необходимо учитывать предельно допустимое количество расплава, проходящего через питатель в процессе заливки КО. В противном случае в отливке под питателем может образоваться усадочная пористость, рыхлота, усадочная раковина или трещина, а также произойти существенное коробление отливки.

Причиной образования вышеуказанных дефектов отливок является местный (локальный) разогрев КО в области питателя, происходящий в результате прохождения чрезмерно большого количества перегретого расплава через данный участок КО. Поэтому для предупреждения образования дефектов под питателем в литниковых системах средних и крупных тонкостенных отливок следует использовать большее количество питателей либо использовать питатель щелевого типа что схематично представлено на рис. 3.98, б. Применение питателей щелевого типа (нижнего или бокового) позволяет не только значительно улучшить условия заполнения отливки расплавом, но и условия её питания.

В качестве примера рассмотрим влияние типа питателя на характер течения расплава в рабочей полости КО и распределение величины усадочной пористости по ширине вертикально заливной плоской отливки с размерами  $100 \times 150 \times 4$  мм из стали 08X14H7МЛ. Для получения отливок изготавливали восьмислойную КО на основе кварцевого песка и гидролизованного раствора этилсиликата с пылевидным кварцем. Начальная температура КО до заливки составляла  $t_2 = 950 \pm 15^\circ\text{C}$ , температура металла при заливке КО  $1580 \pm 10^\circ\text{C}$ , заливку КО проводили на воздухе. Подвод расплава в полость отливки осуществляли через питатель цилиндрической формы, установленный под прямым углом к телу отливки (питатель точечного типа), а также через нижний питатель щелевого типа, что схематично представлено на рис. 3.99, а и рис. 3.99, б соответственно.

Использование питателей различного типа предопределяет не только количество расплава, прошедшего через единицу площади поперечного сечения питателя, но и характер движения потока расплава в рабочей полости КО. Основные направления движения потока расплава в рабочей полости КО на стадии её заполнения расплавом на рис. 3.99, а и рис. 3.99, б обозначены стрелками.

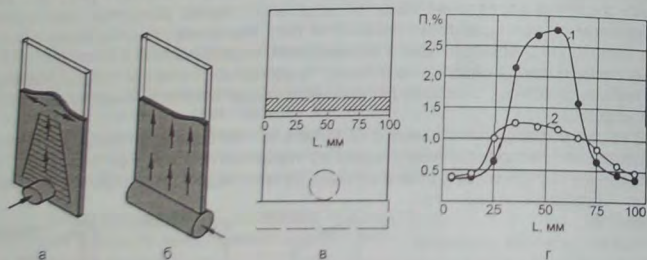


Рис. 3.99. Схемы заполнения рабочих полостей КО расплавом (а, б), схема вырезки образцов (в) и распределение пористости по ширине плоской отливки (г) из стали 08X14H7МЛ: 1 — для отливок, полученных с нижним питателем точечного типа (а); 2 — для отливок, полученных с нижним питателем щелевого типа (б)

Согласно представленным схемам, при подводе расплава в стенку отливки питателем точечного типа (см. рис. 3.99, а), движение потока расплава в рабочей полости КО носит продольно-поперечный характер. То есть преимущественное дви-

жение расплава в рабочей полости КО осуществляется вверх от питателя, к свободной поверхности расплава, с последующим растеканием расплава к торцам рабочей полости в КО. При этом в потоке расплава можно выделить условные проточные и застойные зоны. В данном случае на рис. 3.99, а проточная зона заштрихована.

Проточные и застойные зоны существуют с момента начала и до окончания заливки КО любой отливки. К проточным зонам отливки относятся те области отливки, в которых происходит наиболее интенсивное и длительное движение расплава в процессе заполнения КО (формы).

В случае использования нижнего щелевого питателя (см. рис. 3.99, б) заполнение расплавом рабочей полости КО происходит в основном режиме (преимущественно продольное течение расплава), практически без образования застойных зон.

Как было отмечено выше, практически в любой отливке, независимо от способа подвода расплава в отливку, существуют и проточные, и застойные зоны. Влияние этих зон на качество отливок особенно заметно, если отливка тонкостенная и к ней сти, а в отливках из нержавеющей марок сталей и по качеству поверхности (питтинговой коррозии).

Дело в том, что, как правило, величина усадочной пористости наибольших значений достигает в проточных зонах тонкостенных отливок. Причиной сосредоточения усадочной пористости в проточной зоне (зонах) отливки является неоднородность температурного поля затвердевающего расплава и КО, сформировавшаяся к концу расплава застойных зон, к окончанию заливки, по понятным причинам, имеет более высокую температуру, в связи с чем является своеобразной приливью для затвердевающего расплава застойных зон.

На рис. 3.99, в представлена схема вырезки образцов из плоских отливок (область заштрихована), а на рис. 3.99, г представлены зависимости распределения усадочной пористости по ширине исследованной области плоских отливок, построенные на основании экспериментальных данных, полученных автором.

Анализ характера распределения пористости по ширине отливки (см. рис. 3.99, г) показывает, что наибольшая величина усадочной пористости (~2,7%) наблюдается в осевой части проточной зоны отливки, которая имела питатель точечного типа (зависимость 1). В то же время при щелевом подводе расплава, в отсутствие явно выраженной проточной зоны, усадочная пористость по ширине отливки распределяется более равномерно (зависимость 2), а её максимальное значение не превышает 1,25%.

При заливке высоколегированных хромоникелевых сталей на воздухе в КО, изготовленные на основе огнеупорных суспензий, содержащих пылевидный кварц и гидролизованный раствор этилсиликата, наличие проточных и застойных зон в сочетании с температурой течения расплава в КО во многом предопределяет и области на поверхности отливки, поражённые питтинговой коррозией.

На рис. 3.100 представлены схемы областей поверхности плоских отливок с размерами  $100 \times 150 \times 4$  мм из стали 08X14H7МЛ, поражённых питтинговой коррозией (на плоской отливке области поверхности с питтинговой коррозией заштрихованы).

Заливку отливок, представленных на рис. 3.100, проводили на воздухе, при начальной температуре КО  $t_2 = 950 \pm 15^\circ\text{C}$ . Температура стали при заливке в КО составляла  $1530 \pm 10^\circ\text{C}$  для отливки, представленной на рис. 3.100, а, и  $1590 \pm 10^\circ\text{C}$  для отливки, схемы которых представлена на рис. 3.100, б, в, г (места подвода расплава в питатель или приливь отливки на рис. 3.100 отмечены стрелками).



Анализ характера расположения питтинговой коррозии на поверхности полученных отливок показывает, что с повышением температуры заливки (см. рис. 3.100,а и рис. 3.100,б) площадь поверхности коррозии, пораженная питтинговой коррозией, уменьшается. При этом питтинговая коррозия образуется преимущественно в застойных зонах отливок (см. рис. 3.100,б и рис. 3.100,в), которые в отливке, представленной на рис. 3.100,в, были созданы искусственно, путём выполнения в модели отливки горизонтальной щели. Кроме того (см. рис. 3.100,г), использование верхнего подвода расплава в отливку, при всех прочих равных условиях, также способствует появлению на поверхности отливки питтинговой коррозии.

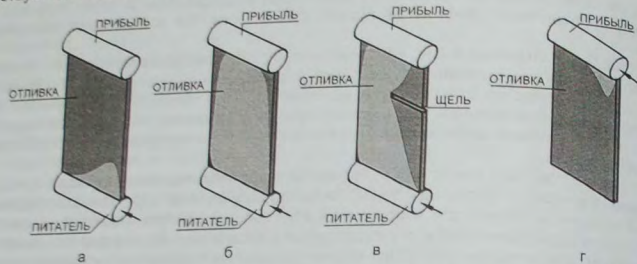


Рис. 3.100. Расположение питтинговой коррозии на поверхностях отливок из стали 08X14H7МЛ

Установлено, что процесс питтинговой коррозии в отливках из высоколегированных хромоникелевых сталей, при их заливке и охлаждении в окислительной среде, происходит в определённом интервале температур на границе раздела отливка-КО.

То есть для предупреждения образования питтинговой коррозии на отливках из высоколегированных хромоникелевых сталей необходимо либо повысить температуру как заливаемого расплава, так и температуру КО, либо понизить и температуру расплава, и начальную температуру КО.

Повышение температуры заливки и начальной температуры КО в данном случае, более предпочтительно, поскольку это не только способствует понижению вероятности образования питтинговой коррозии на отливке, но и улучшает заполняемость КО, снижает количество в отливке окисных плёнок, предупреждает образование в отливке шлаев и недоливов, коробления отливки. При этом, как было отмечено выше, предпочтение следует отдавать заливке снизу (сифоном), либо боковому, либо вертикально-щелевому подводу расплава в отливку.

Верхний подвод расплава в отливку можно рекомендовать для сплавов, не склонных к пленообразованию, и сталей, не склонных к образованию питтинговой коррозии, для сплавов с широким интервалом температур кристаллизации, для тонкостенных отливок, заливаемых в вакууме.

Подвод расплава снизу наименее опасен с точки зрения появления в отливках королек и окисных плёнок, но при этом резко ухудшаются условия питания отливки от верхних прибылей. В особенности это заметно, если прибыль заполняется расплавом, протекающим через тело отливки.

Вертикально-щелевой подвод расплава в отливку наиболее предпочтителен для получения отливок и, в особенности, при литье пленообразующих сплавов. При

возможности выполнения такого подвода металла в отливку данному способу следует отдать предпочтение.

Подвод расплава в толстостенные части отливки осуществляют для усиления эффекта последовательности затвердевания её смежных элементов и обеспечения достаточного питания термических узлов жидким металлом.

При назначении места (мест) подвода расплава в отливку следует избегать в качестве примера представления некоторые варианты схем подвода расплава в термический узел отливки (см. рис. 3.101,а, в, д) и места образования расплава в усадочных дефектах в термическом узле (см. рис. 3.101,б, г).

В случае, если питатель (см. рис. 3.101,а) установить таким образом, чтобы во время заливки поток заливаемого расплава из питателя попадал на выступающую при заливке на рис. 3.101,а, в, д указано стрелками), то, в результате чрезмерно высокого нагрева этой части КО (формы), в термическом узле отливки образуется воздушная или усадочная раковина, что схематично представлено на рис. 3.101,б.

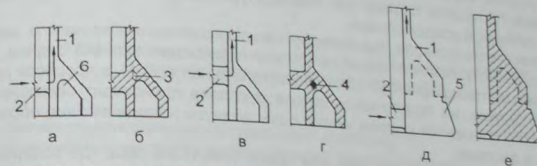


Рис. 3.101. Схемы установки питателей: 1 – тело отливки; 2 – питатель; 3 – усадочная раковина; 4 – рыхлота; 5 – нижняя кольцевая прибыль; 6 – "карман" отливки

В случае, если питатель (см. рис. 3.101,в) установить таким образом, чтобы во время заливки поток заливаемого расплава из питателя поступал непосредственно в термический узел, то это приведёт к образованию в термическом узле отливки рыхлоты, что схематично представлено на рис. 3.101,г.

Для предупреждения образования усадочных дефектов в рассматриваемом термическом узле подвод расплава в отливку следует осуществлять через нижнюю кольцевую прибыль, что схематично представлено на рис. 3.101,д. При этом "карман" в торцевой части отливки впоследствии необходимо будет выполнить механической обработкой.

При проектировании литниковых систем для получения отливок из цветных сплавов следует учитывать температурный интервал их кристаллизации, поскольку сплавы с узким интервалом кристаллизации (узкоинтервальные сплавы), например, алюминий-бронза, кристаллизуются с образованием развитой осевой (сосредоточенной) усадочной пористости в стенках отливок, а сплавы с широким интервалом кристаллизации, например, оловянные бронзы, алюминиевые сплавы и т.п., кристаллизуются с образованием рассредоточенной усадочной пористости.

Поэтому используемые литниковые системы для отливок из сплавов с широким интервалом кристаллизации (широкоинтервальных сплавов) должны обеспечить значительный температурный градиент между отливкой и прибылью (питающим коллектором, стояком), в связи с чем для широкоинтервальных сплавов подвод металла в отливку крупных размеров целесообразно осуществлять через прибыль.



Для узкоинтервальных сплавов можно использовать как подвод расплава в отливку сверху, так и рассредоточенный подвод расплава в отливку с целью выравнивания скорости охлаждения её различных частей.

Литейные свойства сплавов зависят от величины их температурного интервала кристаллизации, величины усадки, наличия в сплаве легкоокисляющихся химических элементов, среды, в которой происходит заливка сплава и т.п.

Чем больше интервал кристаллизации сплава, тем ниже его жидкотекучесть, выше склонность к ликвации и образованию рассредоточенной усадочной пористости в отливках. Большой жидкотекучестью обладают узкоинтервальные и эвтектические сплавы. В стенках отливок из этих сплавов наблюдается сосредоточенная вдоль тепловых осей стенок отливки усадочная пористость и большая усадочная раковина в прибылях. Тем не менее, из узкоинтервальных и эвтектических сплавов получают отливки с наиболее высокой герметичностью.

С величиной интервала кристаллизации сплавов связана их склонность к образованию горячих трещин в отливках. Чем больше интервал кристаллизации сплава, тем выше вероятность образования горячих трещин в отливках. При всех прочих равных условиях вероятность образования горячих трещин в отливках уменьшается с увеличением прочности сплава при температуре кристаллизации и уменьшением величины линейной усадки сплава.

Жидкотекучесть сплавов, содержащих легкоокисляющиеся элементы, зависит от химических свойств газовой среды, в которой происходит заливка формы. При заливке формы в атмосферных условиях (окислительная среда), в процессе движения расплава в форме, на поверхности потока расплава происходит окисление легкоокисляющихся элементов сплава кислородом воздуха и замещение образующихся окислов в расплав.

При заливке сплавов в вакууме или среде инертного газа, где содержание кислорода и паров воды существенно ниже, чем в воздухе, толщина образующейся плёнки окислов на поверхности потока расплава значительно меньше. В связи с этим вероятность появления окисной плёнки, уходящей с поверхности в глубину отливки, значительно ниже, чем у отливок, заливаемых в условиях окружающей (окислительной) среды.

Окисления химических элементов в жидком сплаве не происходит только при выплавке, заливке и кристаллизации сплава в условиях абсолютного вакуума. В реальных условиях получения отливок глубина вакуума, достигаемая в промышленных вакуумных плавильно-заливочных установках весьма далека от абсолютного значения. Поэтому в данном случае понятие вакуум носит, в определённом смысле, условный характер и, по сути, вакуум, достигаемый в современных плавильно-заливочных установках, представляет собой сильно разреженный воздух, что само по себе не исключает вероятность появления в отливках окисных плёнок.

Как было отмечено выше, окисные плёнки в отливке, выявляемые визуально и методами капиллярной дефектоскопии, образуются в результате окисления головной части потока расплава при его течении по каналам КО в процессе её заливки. При этом определяющими факторами в процессе плёнообразования и замешивания образующейся окисной плёнки в расплав являются: температура головной части потока расплава, скорость подъёма уровня расплава в КО, скорость образования окисной плёнки и природа газовой среды в полости КО (среда окислительная, восстановительная, нейтральная).

На рис. 3.102 представлены зависимости, определяющие характер влияния некоторых технологических параметров на количество окисных плёнок в отливках из сплавов с температурой  $t_{\text{з}} \geq 1300^{\circ}\text{C}$ , залитых в атмосферных условиях.

Согласно зависимостям, представленным на рис. 3.102, количество окисных плёнок в отливках уменьшается с повышением начальной температуры формы ( $T_{\text{з}}$ ), отливки ( $\delta$ ), а также при понижении величины теплоаккумулирующей способности материала КО ( $b_2$ ). Увеличение скорости подъёма расплава в КО при заливке до определённого предела, выше которого увеличение скорости заливки КО приводит к развитию интенсивной турбулизации потока расплава в рабочей полости КО, и способствует увеличению числа окисных плёнок вторичного окисления расплава на поверхности отливки.

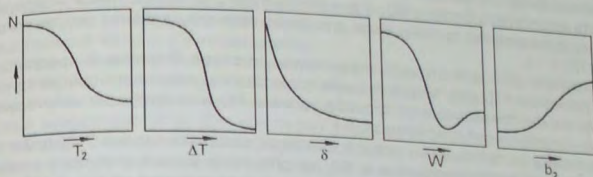


Рис. 3.102. Зависимость количества поверхностных окисных плёнок ( $N$ ) в отливках от технологических параметров

### 3.9. Литниково-питающие системы для отливок, получаемых методом направленной кристаллизации

Искусственно создаваемый положительный температурный градиент по высоте отливки в способах направленной кристаллизации позволяет в полной мере реализовать основное условие идеального питания затвердевающей отливки, когда каждый вышележащий слой расплава кристаллизующейся отливки является своеобразной прибылью для нижележащего затвердевающего слоя металла.

Методом направленной кристаллизации получают отливки практически любой степени сложности, начиная от отливок простой конфигурации, например, турбинных лопаток, и заканчивая крупногабаритными фасонными отливками корпусного типа. Выход годного в данном способе литья, как правило, составляет 65...85%.

В основном, способы получения отливок направленной кристаллизацией, реализованные в промышленных условиях, предполагают до заливки примерно равенство начальной температуры КО и заливаемого в неё расплава, а также кристаллизацию расплава в условиях положительного градиента температуры по высоте отливки в вакууме. В связи с этим, для выполнения вышперечисленных условий, основными задачами ЛПС являются: обеспечение требуемой величины металлостатического напора в КО, обеспечение достаточного запаса расплава, необходимого для питания затвердевающей отливки.

Исходя из ограниченного числа задач, решаемых ЛПС, для отливок, получаемых методом направленной кристаллизации, используют как ЛПС простой конструкции, состоящие, в основном, из чаши-прибыли и питателей или из одной воронки-прибыли, так и более сложные конструкции ЛПС, если в модельном блоке предусмотрено выполнение нескольких моделей отливок или модель отливки имеет весьма сложную конфигурацию. В таких случаях разрабатываемая конструкция ЛПС должна обеспечить:

- полное заполнение всех полостей КО расплавом;











На отечественных предприятиях при получении отливок в установках высоко-затравочные кристаллы используют скоростной направленной кристаллизации

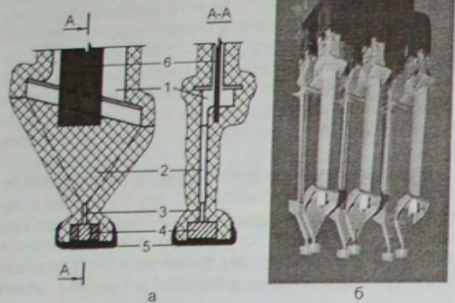


Рис. 3.107. Схема установки затравочного кристалла под стартовый конус турбинной лопатки с керамическим стержнем (а) и общий вид (б) модельного блока турбинных лопаток для направленной кристаллизации

структурой в условиях высокоскоростной направленной кристаллизации. На рис. 3.107,а обозначены: 1 – рабочая полость КО, 2 – стартовый конус; 3 – кристалловод; 4 – затравочный кристалл; 5 – самотвердеющая огнеупорная паста; 6 – керамический стержень.

При получении турбинных лопаток в условиях высокоскоростной направленной кристаллизации плавление шихтовой заготовки проводят в тигле плавильной печи, а расплав из тигля печи в КО, подают через специальный металлопровод (лейку), выполненный по технологии изготовления КО. Для заливки лейку устанавливают в пространстве между сливным носком тигля печи и КО. В нижней части, под металлоприёмной чашей, металлопровод лейки раздваивается. При подготовке КО к заливке нижние концы металлопровода выставляют в пространстве плавильно-заливочной установки таким образом, что бы они входили в полость чаши КО. Для предупреждения попадания случайных частиц в полость КО чашу КО накрывают специальной керамической пластиной (крышкой), в которой предусмотрены щели для ввода металлопроводов лейки.

На рис. 3.108,а представлен общий вид модели металлопровода (лейки), а на рис. 3.108,б – общий вид модельного блока турбинных лопаток, заполняемый посредством лейки. Согласно рис. 3.108,а лейка состоит из металлоприёмной чаши 1 и металлопроводов 2, соединённых между собой технологической перемычкой 3. Как правило,

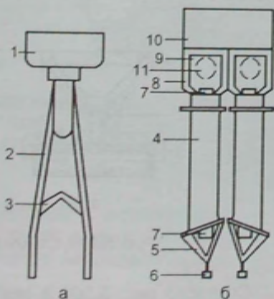


Рис. 3.108. Схема лейки (а) и модельного блока турбинных лопаток (б)

диаметр металлопроводов составляет 10 мм, длина – около 350 мм. Во время заливки КО из приёмной чаши-лейки 1 по металлопроводам 2 в литниковую чашу КО, установленную под лейкой. Из ЛЧ 10 (см. рис. 3.108,б) по литниковым ходам 8 расплав попадает в полость отливки 4, где, в данном примере, установлен керамический стержень 7. Из полости отливки расплав поступает в стартовый конус и кристалловоды 5, по которым проходит к поверхности затравочного кристалла 6.

После установки затравочного кристалла (диаметр кристалла – 8...10 мм, толщина – 3...6 мм) соответствующей кристаллографической ориентации в стартовый конус его закрепляют в КО, используя для этого самотвердеющую огнеупорную смесь.

На рис. 3.107,а представлены схемы разрезов КО в области стартового конуса, а на рис. 3.107,б представлен модельный блок с шестью моделями, предназначенный для получения турбинных лопаток с направленно-столбчатой

структурой в условиях высокоскоростной направленной кристаллизации. На рис. 3.107,а обозначены: 1 – рабочая полость КО, 2 – стартовый конус; 3 – кристалловод; 4 – затравочный кристалл; 5 – самотвердеющая огнеупорная паста; 6 – керамический стержень.

Технологические окна имеют такие размеры, которые обеспечивают прохождение через них молибденовых или графитовых штырей 11, удерживающих КО на подвижном штоке установок литниковые

В некоторых случаях для предупреждения образования усадочных рынков в "тупиковых", непитаемых частях направленно-закристаллизованной отливки предусматривают подвод дополнительных питателей к этим частям. В качестве примера использования дополнительных питателей на рис. 3.109 представлена схема модели турбинной лопатки 2, предназначенная для получения отливки с монокристаллической структурой. Согласно рис. 3.109 от верхней части модели 1 турбинной лопатки отходят дополнительные питатели 3, сообщающие верхнюю часть будущей отливки с торцами её полки. Затравочный кристалл после изготовления КО устанавливают в полости 6, которая сообщается с отливкой через кристалловод 5 и стартовый конус 4.

В процессе кристаллизации питатели 3 обеспечивают доступ расплава в "тупиковые" (непитаемые) части отливки, тем самым предотвращая образование усадочной пористости в этих частях.

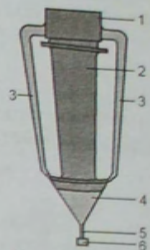


Рис. 3.109. Схема расположения питателей на турбинной лопатке

### 3.10. Литниково-питающие системы для центробежного литья с вертикальной осью вращения

Центробежным способом с вертикальной осью вращения, в основном, получают отливки из титановых сплавов. Высокая химическая активность титановых сплавов по отношению к материалу оболочковой формы вынуждает проводить заливку металла в вакууме при невысокой начальной температуре формы. В то же время высокая скорость затвердевания титановых сплавов и образующиеся при этом значительные газовые потоки в каналах формы требуют высоких скоростей заполнения формы. Исследования показывают [290], что для получения качественных отливок из титановых сплавов скорость течения расплава в форме должна быть не менее 0,8 м/с, а величина давления – не менее 0,12 МПа, но не более величины, приводящей к деформации или разрушению формы.

Вышперечисленным требованиям получения отливок из титановых сплавов удовлетворяет центробежная заливка с вертикальной осью вращения, где заполнение рабочих полостей формы расплавом происходит под действием центробежной силы. Величину центробежной силы, развиваемой в процессе центробежного литья с вертикальной осью вращения, рассчитывают по формуле:



$$F = m \cdot r \cdot \omega^2, \quad (3.68)$$

где  $m$  – масса, сосредоточенная в данной точке формы;  $r$  – расстояние от рассматриваемой точки до оси вращения формы;  $\omega$  – угловая скорость вращения формы. Удельной силой называют силу, отнесённую к единице объема:

$$f = \rho_1^1 \cdot r \cdot \omega^2, \quad (3.69)$$

где  $\rho_1^1$  – плотность расплава.

Если выражение удельной центробежной силы разделить на удельный вес вращающегося в форме расплава ( $\gamma$ ), то в результате получаем выражение, называемое коэффициентом утяжеления:

$$K = \frac{\rho_1^1 \cdot r \cdot \omega^2}{\gamma} \quad (3.70)$$

Поскольку плотность расплава и его удельный вес связаны соотношением  $\gamma = \rho_1^1 g$ , то уравнение (3.70) можно записать в виде:

$$K = \frac{r \cdot \omega^2}{9,81} \quad (3.71)$$

Или

$$K = \frac{r \cdot (6,28 \cdot n)^2}{9,81} = 4,02 \cdot r \cdot n^2, \quad (3.72)$$

где  $n$  – частота вращения формы, об/с.

Коэффициент утяжеления является одним из важнейших технологических параметров центробежного литья. Его значение показывает изменение веса расплава в центробежном поле по сравнению с его весом в гравитационном поле. Как правило, при литье титановых сплавов величина  $K=25...60$  [290], что обеспечивает получение качественных отливок. Соответственно, задаваясь величиной  $K$  в пределах от 25 до 60, несложно рассчитать частоту вращения формы при заливке, используя уравнение (3.72). С увеличением величины  $K$  ускоряются процессы удаления из расплава неметаллических включений и газов. Кроме того, усиливается тенденция направленности затвердевания отливки от её периферии к оси вращения.

Эффект направленности затвердевания отливки в центробежном поле обусловлен тем, что образующиеся в процессе кристаллизации расплава разобшённые кристаллики имеют плотность несколько большую, чем расплав. Это обстоятельство и является основной движущей силой перемещения кристалликов в расплаве в направлении от оси вращения к наиболее удалённому от неё частям отливки. В свою очередь, преимущественное накопление твёрдой фазы в периферийных частях затвердевающей отливки и приводит, в определённой степени, к созданию эффекта направленности её затвердевания.

Использование центробежной силы в процессе кристаллизации металла способствует улучшению условий питания отливки, поскольку затвердевание отливки происходит в условиях повышенного давления. Величину давления в металле при центробежной заливке рассчитывают по формуле:

$$P = 9,81 \cdot \rho_1^1 \cdot \left[ \frac{\omega^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)}{9,81} - h \right], \quad (3.73)$$

где  $r_2$  – радиус вращения рассматриваемой точки;  $r_1$  – радиус свободной поверхности расплава в форме;  $h$  – высота столба расплава над рассматриваемой точкой в отсутствие вращения формы.

Особенности центробежной заливки и свойства заливаемых сплавов определяют особенности конструкций используемых для этих целей ЛПС. На рис. 3.110 представлены схемы типовых металлопроводов, используемых для центробежной заливки. Согласно рис. 3.110 оболочковую форму 10 располагают в контейнере 9, заполненном опорным наполнителем или опорными шарами 8. Для заливки контейнер устанавливают на стол 4 центробежной машины. Заливку расплава в форму осуществляют с использованием приёмно-направляющего лотка 1 глубиной 180...200 мм, у которого выполнена одноразовая графитовая направляющая втулка 2. Расстояние между нижним срезом графитовой втулки и верхним срезом стояка составляет 40...50 мм.

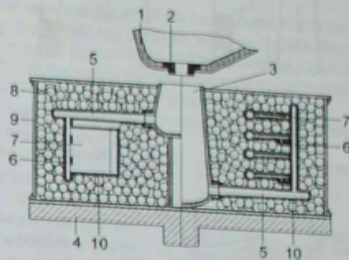


Рис. 3.110. Схема типового металлопровода для центробежной заливки формы

При заливке расплав из тигля печи поступает в лоток 1 и через втулку 2 истекает в стояк 3. Приобретая в стояке вращательное движение, расплав центробежной силой "отбрасывается" к вертикальным стенкам стояка и поступает в горизонтальные литниковые ходы 5. По мере заполнения горизонтального литникового хода 5 расплав поступает в коллектор 6, откуда через питатели попадает в рабочую полость 7 оболочковой формы.

Используемые в данном способе литья типы ЛПС классифицируют по направлению заполнения рабочей полости формы, а именно: радиальное, по касательной, псевдосифонное. Некоторые виды ЛПС, используемые при получении отливок в условиях центробежной заливки с вертикальной осью вращения, представлены на рис. 3.111.

Рассчитывая литниковую систему для центробежной заливки, прежде всего исходят из необходимости обеспечения неразрывности струи расплава, поступающего в форму. То есть исходным в расчёте литников является выполнение условия [290]:

$$Q_T > n_2 Q_{0Тл}, \quad (3.74)$$

где  $Q_T$  – удельный расход металла при выпуске из печи, кг/с;  $n_2$  – количество одновременно заливаемых отливок, шт;  $Q_{0Тл}$  – удельный расход металла, необходимый для заполнения одной отливки, кг/с.

Обязательным условием при комплектовании групп отливок является выполнение соотношения:



$$G_T > (n_1 \cdot m + G_{П1} + G_{П2})$$

(3.75)

где  $G_T$  — максимальная масса металла, сливаемого из тигля, кг,  $m$  — масса одной отливки с прибылью, кг,  $G_{П1}$ ,  $G_{П2}$  — масса литниковой системы и потерь соответственно, кг,  $n_1$  — количество отливок в форме, шт.

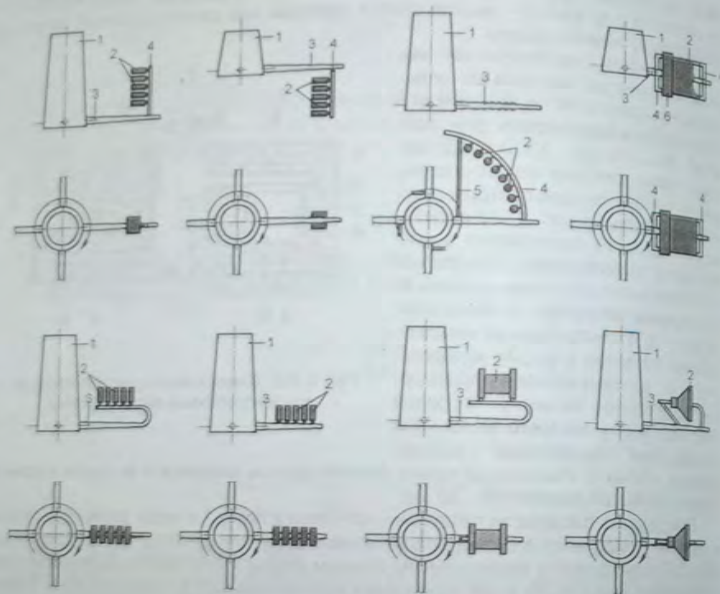


Рис. 3.111. Схемы ЛПС для центробежного литья с вертикальной осью вращения формы:

1 — стояк; 2 — отливки; 3 — горизонтальный литниковый ход; 4 — коллектор; 5 — технологический канал; 6 — прибыль

Постоянство величины удельного расхода металла в литниковой системе при центробежном литье обеспечивают путем изменения скорости поворота тигля плавильной печи, контролируемого компьютером по специальной программе.

Значение величины  $q_{отл}$  определяют в результате теплового расчёта заполнения формы расплавом либо, для ориентировочных расчётов при литье отливок из титановых сплавов, используют данные, приведенные в табл. 3.30 [290].

Таблица 3.30

Удельный расход металла	Наибольший габаритный размер стенки отливки, мм			
	До 100	100–200	200–400	Более 400
Для отливок с толщиной стенки 4–6 мм, кг/с	0,5	1,0	3,0	>6,0
Для отливок с толщиной стенки менее 3 мм, кг/с	1,0	2,0	3,0	>12

Используя данные табл. 3.30 можно рассчитать ориентировочный расход расплава при его выпуске из тигля печи. Для этого значение  $q_{отл}$  принимают по данным табл. 3.30, а расход расплава при выпуске из печи рассчитывают по формуле:

$$Q_{щел} = \frac{n \cdot m}{\tau} = n \cdot g_{отл} \quad (3.76)$$

где  $\tau$  — время заливки одной отливки, с.

Как было отмечено выше, в процессе заливки расплав из тигля печи поступает в приемно-направляющий лоток, из которого попадает в стояк вращающейся формы (для получения отливок из титановых сплавов используют титановые или стальные стояки многоразового использования). В стояке расплав приобретает вращательное движение и, под действием центробежной силы, поступает в литниковые ходы.

При этом, с поступлением в стояк первых порций расплава, необходимо обеспечить высокую удельную скорость заполнения литниковых ходов. Удельная скорость поступления расплава из стояка в литниковые ходы зависит от частоты вращения формы и возрастает с её увеличением. Тем не менее, с определённого момента увеличение частоты вращения ( $n$ ), при использовании стояка с гладкими стенками, приводит к ухудшению заполняемости форм металлом, появлению в отливках слёв и недоливов. Это явление вызвано инерционным скольжением расплава в стояке, величина которого возрастает с увеличением  $n$  [118; 258].

С целью обеспечения необходимых расходных характеристик литниковой системы стояки выполняют с донными ребрами. То есть, во избежание проскальзывания расплава в стояке в период приобретения расплавом вращательного движения, в донной части стояков выполнены захватывающие элементы (донные ребра). Стояки данного типа называют вентиляторными (см. рис. 3.112).

Как было отмечено выше, в процессе вовлечения расплава во вращательное движение в стояке происходит растекание расплава по его внутренней поверхности. Во избежание выброса расплава из стояка при заливке, рабочие поверхности стояка выполняют с обратной конусностью ( $1..2^\circ$ ) и диаметром от 120 до 200 мм.

При вращении свободная поверхность расплава в стояке приобретает форму параболоида и описывается уравнением:

$$Z = \frac{\omega^2 \cdot r^2}{2 \cdot g} \quad (3.77)$$

или

$$Z = \frac{2 \cdot (\pi \cdot n \cdot r)^2}{g} \quad (3.78)$$

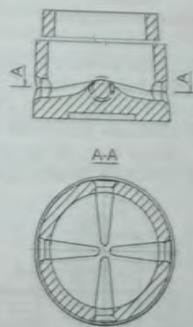


Рис. 3.112. Схема стояка вентиляторного типа



На рис. 3.113 представлено схематическое расположение свободной поверхности расплава по окончании процесса заполнения формы расплавом. Из рис. 3.113 видно, что при недостаточно высокой частоте вращения формы (кривая 1) свободная поверхность расплава может пройти через тело отливки, что, в свою очередь, приведёт к недоливу верхнего ряда отливок или верхней части стенки отливки. Во избежание этого при заливке необходимо обеспечить такую частоту вращения формы, при которой все отливки и их прибыли находились бы ниже уровня свободной поверхности расплава (кривая 2). То есть, для гарантированного расплава всех рабочих полостей формы расплавом необходимо знать минимальнодопустимую частоту её вращения.

Рис. 3.113. Схема расположения свободной поверхности расплава по окончании процесса заполнения формы

Для расчёта минимальнодопустимой частоты вращения формы, обеспечивающей полное заполнение рабочих полостей формы расплавом, автором разработан следующий графоаналитический способ. Перед началом расчёта следует (см. рис. 3.114) в масштабе вычертить разрез реальной формы и определить расстояние (по вертикали)  $\Delta Z$  между нижней точкой свободной поверхности расплава в литниковом ходе (точка В на рис. 3.114) и верхней точкой на свободной поверхности расплава в форме, наиболее удалённой от оси вращения (точка А на рис. 3.114).

Кроме того, по чертежу следует определить величину удаления точек А и В от оси вращения формы ( $r_A$  и  $r_B$ ).

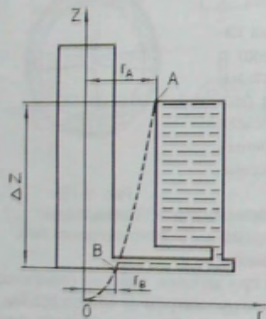


Рис. 3.114. Схема расположения свободной поверхности расплава по окончании процесса заполнения формы

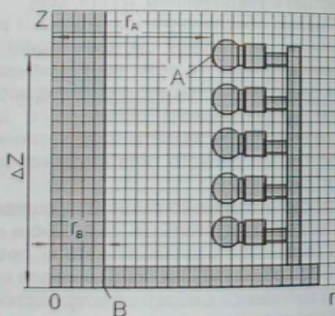


Рис. 3.115. Схема к расчёту минимальнодопустимой частоты вращения формы

После определения по чертежу значений  $\Delta Z$ ,  $r_A$  и  $r_B$  величину минимальнодопустимой частоты вращения формы (об/мин) рассчитывают по формуле:

$$n_{\text{MIN}} = 60 \sqrt{\frac{0,5 \cdot \Delta Z \cdot g}{\pi (r_A^2 - r_B^2)}} \quad (3.79)$$

или

$$n_{\text{MIN}} = 42,32 \sqrt{\frac{\Delta Z}{r_A^2 - r_B^2}} \quad (3.80)$$

где  $\Delta Z$  – расстояние по вертикали между точками А и В, м;  $r_A$ ,  $r_B$  – расстояние между осью вращения формы и точками А и В соответственно, м;  $\pi \approx 3,14$ .

**Пример 3.12.** Для титанового сплава рассчитать минимальнодопустимую частоту вращения формы, которая схематично представлена на рис. 3.115. Согласно рис. 3.115  $\Delta Z=0,4$  м,  $r_A=0,3$  м,  $r_B=0,1$  м. В результате расчёта по формуле (3.79) получаем следующее значение  $n_{\text{MIN}}$ :

$$n_{\text{MIN}} = 60 \cdot [0,5 \cdot 0,4 \cdot 9,81 / (0,3^2 - 0,1^2)]^{0,5} / 3,14 = 94,6 \approx 95 \text{ об/мин.}$$

Расчёт завершён.

Как было отмечено выше, при центробежной заливке форм с вертикальной осью вращения расплав из стояка попадает в симметрично расположенные горизонтальные литниковые ходы. Поскольку с удалением от оси вращения скорость движения расплава по литниковому ходу возрастает, то для обеспечения условия неразрывности струи литниковый ход выполняют конической или конической формы. Как правило, литниковый ход выполняют диаметром 30...60 мм в начале, с метало-сорборником (зумпфом) в конце.

Глубина метало-сорборника (зумпфа), как правило, составляет 40...60 мм. Основное назначение метало-сорборника – улавливание первых порций расплава, как наиболее загрязнённых газами, выделившимися из формы.

В последующие периоды заливки расплав из литникового хода поступает в коллектор и через питатели – в полость отливки. При расчёте размеров питающих отливку элементов ЛПС (прибыли, питатели) следует исходить из тех же положений, на основе которых проводят расчёт ЛПС схемы А.

В центробежном литье с вертикальной осью вращения, при всех прочих равных условиях, на качество отливок большое влияние оказывает место подвода расплава в полость отливки и её расположение относительно оси вращения формы.

На рис. 3.116 представлена общепринятая схема обозначений основных направлений движения расплава в форме при заливке.

Установлено [290], что наиболее качественные отливки из титановых сплавов можно получить в том случае, если они ориентированы в направлениях (см. рис. 3.116) -X, +Z, -Z, +Y. Худшее качество у отливок, ориентированных при заливке в направлениях +X и -Y (как правило, эти отливки поражаются спаями и корольками).

При выборе мест подвода расплава в рабочую полость графитовой оболочковой формы (ГО) следует учитывать, что на развитие неоднородности (по химическому составу, по механическим свойствам, по структуре и пр.) поверхностного слоя отливки из титановых сплавов в значительной степени оказывает влияние количество расплава ( $m_s$ ), прошедшее через единицу площади того или иного поперечного сечения отливки.

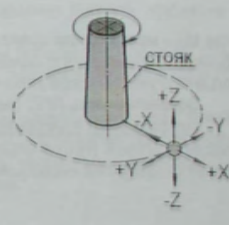


Рис. 3.116. Схема основных направлений движения расплава в форме в условиях центробежной заливки с вертикальной осью вращения



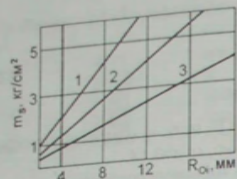


Рис. 3.117. Зависимость предельно допустимой толщины  $m_s$  от приведенной толщины сечения отливки и перегрева заливаемого расплава на: 100°C (1), 120°C (2), 150°C (3)

### 3.11. Техничко-экономические показатели литниково-питающих систем

Эффективность спроектированной ЛПС и отливки оценивают следующими технико-экономическими показателями.

Выход годного. Величину выхода годного литья (ВГ) рассчитывают по формуле:

$$ВГ = \frac{M_0 \cdot N_0 \cdot N_B}{M_{ш}}, \quad (3.81)$$

где  $M_0$  – масса одной отливки, кг;  $N_0$  – число отливок в модельном блоке;  $N_B$  – число блоков, заливаемых с одной плавки, шт;  $M_{ш}$  – масса металлической части шихты в плавке с учётом угара химических элементов, кг.

Эффективность ЛПС тем выше, чем больше значение показателя ВГ.

Коэффициент выхода отливок (КВО). КВО представляет собой отношение числа годных отливок ( $N_{гп}$ ) к числу залитых ( $N_{оп}$ ) за определённый период производства литья (в пределах нескольких плавков):

$$КВО = \frac{N_{гп}}{N_{оп}}. \quad (3.82)$$

КВО определяют на основании статистических данных текущего производства для каждого наименования отливок. Величина КВО зависит от технологичности отливки, эффективности используемой ЛПС, требований к литой детали, уровня технологии и культуры производства в литейном цехе. При производстве отливок необходимо стремиться, чтобы величина КВО была как можно ближе к единице.

Коэффициент использования залитого в форму расплава. Коэффициент использования залитого в форму расплава (КИР) рассчитывают по формуле:

$$КИР = \frac{M_d \cdot N_0 \cdot КВО}{M_0 \cdot N_0 + G_d} \quad (3.83)$$

где  $M_d$  – масса одной детали, кг;  $G_d$  – масса ЛПС, кг.

наиболее "опасных" в этом отношении, относятся участки отливки, расположенные вблизи питателей, внутренние углы ГО и градем более неоднородной поверхность отливки по содержанию углерода в данном сечении.

Зависимости предельнодопустимых значений  $m_s$  для титановых отливок от приведенной толщины  $i$ -го сечения отливки  $R_{0i}$  и величины перегрева расплава при его заливке в форму представлены на рис. 3.117. Анализ хода зависимостей, представленных на рис. 3.117, показывает, что с понижением температуры заливки и увеличением приведенной толщины сечения отливки величина  $m_s$  возрастает.

КИР – комплексный показатель, позволяющий оценить не только технологичность отливки, но и массовую и, следовательно, размерную точность отливки. Повышению КИР, при всех прочих равных условиях, способствует уменьшение напусков и припусков на механическую обработку отливки.

Коэффициент использования площадей. Коэффициент использования площадей (КИП) рассчитывают по формуле:

$$КИП = \frac{M_0 \cdot N_0 \cdot КВО}{S_B} \quad (3.84)$$

где  $S_B$  – площадь модельного блока в плане, определённая по габаритным размерам,  $m^2$ .

КИП – показатель, определяющий эффективность использования площадей в хранилищах, на стеллажах и конвейерах-накопителях модельного и формовочного отделений, рабочего пространства прокаточных печей и т.п.

Вышеприведенные показатели используют для определения наиболее экономичного варианта ЛПС, разработанного для той или иной отливки. Показатель выхода годного литья является важнейшим показателем ЛПС на стадии её проектирования и, по большей части, является чисто теоретическим. Это связано с тем, что показатель, рассчитанный по формуле (3.81), не учитывает величину реального брака отливок, получаемого при использовании той или иной конструкции ЛПС для данной отливки.

Поэтому расчёт по формуле (3.81) даёт величину ожидаемого (прогнозируемого) выхода годного. Показатель, рассчитанный по формуле (3.82), позволяет оценить реальную величину выхода отливок, но при этом не позволяет оценить эффективность используемой ЛПС.

В связи с этим, для оценки реальной эффективности работы той или иной конструкции ЛПС рекомендуется использовать показатель реального выхода годного (РВГ) [233].

Показатель РВГ определяют на основе статистических данных о величине брака в конкретных условиях производства, для конкретной ЛПС, по каждому конкретному наименованию отливок. Для определения значения РВГ необходимо перемножить значения ВГ и КВО. В результате перемножения получаем:

$$РВГ = ВГ \cdot КВО = \frac{M_0 \cdot N_0 \cdot N_B \cdot N_{гп}}{M_{ш} \cdot N_{оп}} \quad (3.85)$$

Показатель РВГ, по сравнению с показателями ВГ и КВО, более информативен и позволяет реально оценить уровень используемой в цехе технологии, технологичность отливки и эффективность используемой ЛПС.

Чем ближе величина показателя РВГ к величине ВГ, тем стабильней технологический процесс производства данной отливки, тем технологичней конструкция отливки и эффективней ЛПС, используемая для данной отливки.



При изготовлении отливок методом литья по выплавляемым моделям используют стержни керамические, графитовые и водорастворимые.

Керамические и графитовые стержни используют для выполнения внутренних полостей отливок в условиях мелкосерийного и серийного производства, в случае, когда эти полости невозможно выполнить путём нанесения на модель огнеупорного покрытия либо когда прочность огнеупорного покрытия в этих полостях недостаточна. Как правило, к числу полостей отливок, выполняемых керамическими и графитовыми стержнями, относят полости щелевого типа или отверстия, шириной (диаметр) которых до 3...5 мм и (или) протяжённость превышает 3...4 ширины (диаметра) самой полости.

Водорастворимые стержни используют для выполнения внутренних поверхностей моделей в случае, когда эти поверхности возможно оформить телом КО (формы) в отливке, но невозможно или нецелесообразно выполнить в модели постоянным стержнем пресс-формы. То есть водорастворимый стержень целесообразно применять тогда, когда использование постоянного стержня в пресс-форме влечёт за собой значительное усложнение её конструкции или не позволяет достичь требуемого уровня точности и качества внутренней полости модели. Водорастворимые стержни, как и стержни керамические, используют только при получении моделей отливок в условиях мелкосерийного или серийного производства литья.

Принцип выполнения внутренних полостей отливки с помощью керамического или графитового стержня рассмотрим на примере отливки, этапы изготовления которой схематично представлены на рис. 4.1.

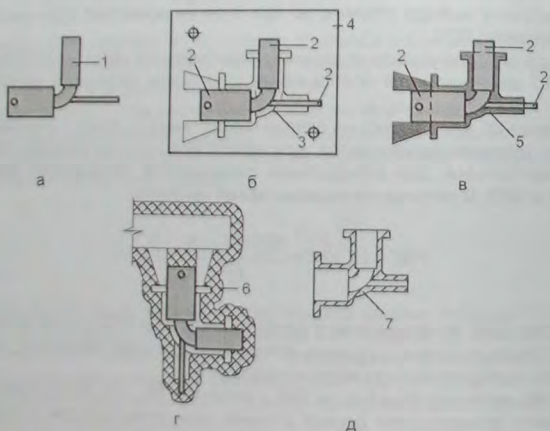


Рис. 4.1. Этапы выполнения в отливке внутренних полостей с помощью стержня: 1 – стержень керамический (графитовый); 2 – знаковая часть стержня; 3 – рабочая полость пресс-формы; 4 – пресс-форма; 5 – модель отливки со стержнем; 6 – КО (ГО); 7 – отливка

Для изготовления модели керамический (графитовый) стержень 1 (см. рис. 4.1,а) устанавливают в рабочую полость 3 пресс-формы 4, где положение стержня фикси-

руется посредством его стержневых знаков 2 (см. рис. 4.1,б). После установки стержня пресс-форму собирают и запрессовывают в неё пастообразный модельный состав. После затвердевания и охлаждения модель 5 (см. рис. 4.1,в) со стержнем внутри извлекают из пресс-формы.

Изготовленную модель используют для монтажа модельного блока. В дальнейшем, на блок наносят огнеупорное покрытие и выплавляют из блока модельный состав. После выплавления из блока модельного состава стержень остаётся в рабочей полости КО (ГО), зафиксированный её телом (см. рис. 4.1,г). После прокаливания КО (обжига ГО), её заливают металлом, очистки поверхности залитого блока и отделения отливки от ЛПС проводят удаление стержня из отливки 7 (см. рис. 4.1,д).

В отличие от керамического или графитового стержня, как было отмечено выше, водорастворимый стержень используют для получения внутренних поверхностей модели. Поэтому водорастворимый стержень удаляют из модели отливки после её извлечения из пресс-формы путём растворения стержня в воде.

Данный процесс поясним на примере модели отливки, этапы изготовления которой схематично представлены на рис. 4.2.

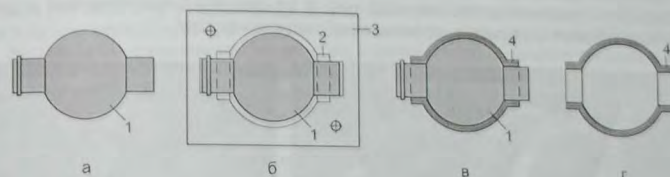


Рис. 4.2. Этапы выполнения внутренней полости в модели отливки с использованием водорастворимого стержня

Для изготовления модели отливки водорастворимый стержень 1 (см. рис. 4.2,а) устанавливают в рабочую полость 2 пресс-формы 3 (см. рис. 4.2,б). После установки стержня, пресс-форму собирают и запрессовывают в неё пастообразный модельный состав. По окончании затвердевания модельного состава модель 4 со стержнем 1 из пресс-формы извлекают (см. рис. 4.2,в). Для удаления стержня из модели последнюю погружают в воду (вода должна иметь температуру около 24°C). По прошествии 20...60 мин, в результате полного растворения водорастворимого стержня, получают модель отливки 4 (см. рис. 4.2,г).

Преимущественные области применения наиболее распространённых типов керамических и графитовых стержней приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Преимущественные области применения стержней	
Стержни	Преимущественные области применения
Спечённые (основа стержня – $Al_2O_3$ , $SiO_2$ , $ZrO_2$ и т.п.)	Отливки из сталей и сплавов на основе Ni
Безобжиговые, холоднотвердеющие (основа стержня – $Al_2O_3$ или $SiO_2$ )	Отливки из сплавов на основе Fe и Cu
Безобжиговые, холоднотвердеющие (основа стержня – гипс)	Отливки из сплавов на основе Mg, Al и Cu
Спечённые (основа стержня – графит или кокс)	Отливки из сплавов на основе Ti



#### 4.1. Стержни керамические

Основой всех керамических стержней является огнеупорный пылевидный материал (ПМ). Получают керамические стержни в результате проведения процессов формообразования и связывания между собой частиц ПМ путём высокотемпературного спекания (обжига); спекания и последующей пропитки жидким связующим веществом; химического отверждения связующего вещества смеси в пресс-форме; затворения вяжущего вещества керамической смеси в пресс-форме и т.п.

Преимущественная область применения спечённых керамических стержней, получаемых путём обжига — производство пустотелых турбинных лопаток из жаропрочных сплавов на основе никеля, кобальта, железа и т.п. С помощью спечённых керамических стержней в турбинных лопатках выполняют внутренние полости щелевого типа с толщиной от 0,35 мм и более и протяжённостью, превышающей толщину стержня в десятки и сотни раз.

Вид некоторых спечённых керамических стержней, используемых для изготовления турбинных лопаток ГТД, представлен на рис. 4.3,а (на рис. 4.3,а длина наибольшего стержня составляет ~220 мм), а на рис. 4.3,б представлена модель лопатки соплового аппарата с керамическим стержнем внутри.

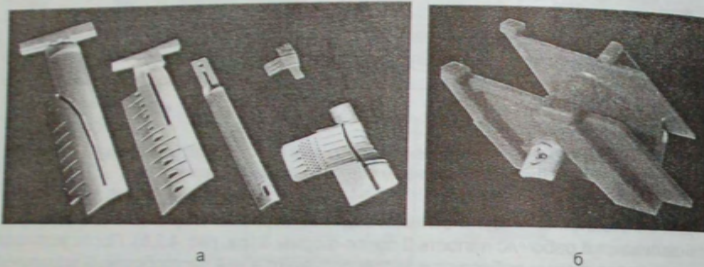


Рис. 4.3. Керамические стержни для моделей турбинных лопаток (а) и модель лопатки соплового аппарата с керамическим стержнем (б)

Для фиксации стержня в КО в его конструкции предусматривают знаковые части (2...5 шт.), которые выходят за пределы модели отливки на 4...15 мм (см. рис. 4.3,б). С целью предупреждения разрушения керамического стержня при прокаливании и заливке КО, а также для предупреждения образования горячих трещин в отливке, все знаковые части стержня, кроме одного (основного места крепления керамического стержня в КО), выполняют с зазором по отношению к телу КО. Для выполнения этого зазора все знаки стержня, кроме основного, "раззазоривают" — покрывают слоем парафина толщиной около 0,10...0,15 мм либо на поверхность знаковых частей стержня наклеивают клейкую полимерную плёнку (ленту) известной толщины, например, ленту скотч. В дальнейшем при выплавлении модельного состава из КО или при прокаливании КО парафин или плёнка соответственно, удаляется со знаковых частей стержня, образуя термокомпенсационный зазор соответствующей толщины между знаковой частью стержня и КО.

Если стержень имеет один стержневой знак, то, по понятным причинам, его не "раззазоривают".

По сути, "раззазоренный" стержень в рабочей полости КО, после выплавления из неё модельного состава или прокаливания КО, становится консольнозакреплённым элементом формы.

"Раззазоривание" — операция вынужденная, нежелательная, но обязательная. Дело в том, что, как правило, коэффициент термического линейного расширения (КТЛР) материала КО и стержня не одинаковы. Поэтому при нагреве КО под заливку или во время предварительного прокаливания КО жёстко зажатый в ней керамический стержень будет испытывать растягивающие (если КТЛР стержня меньше КТЛР КО) или сжимающие (если КТЛР стержня больше КТЛР КО) напряжения, что, в любом случае, приведёт к его деформации или разрушению. Если КТЛР стержня и КО равны, то, в силу различия в интенсивности нагрева стержня и стенок КО теллотой залитого в КО расплава, также произойдёт определённая деформация жёстко закреплённого стержня.

Отсутствие жёсткой связи между КО и "раззазоренными" знаковыми частями керамического стержня, с одной стороны, предупреждает его деформацию и разрушение в процессе прокаливания КО и затвердевания отливки, с другой — наличие зазора между КО и знаковой частью стержня является причиной его смещения внутри отливки (на величину зазора между "раззазоренной" знаковой частью стержня и телом КО), что нежелательно, поскольку это снижает точность получаемой отливки.

Величина и направление деформации керамического стержня в рабочей полости КО также зависит от формы и размеров стержня, способа подвода металла в отливку, скорости заливки формы и выбора знаков стержня для "раззазоривания".

Величина деформации керамического стержня уменьшается с понижением температурного градиента по его длине и ширине. То есть короткие и тонкостенные стержни в меньшей степени склонны к деформации.

По степени увеличения деформации керамических стержней способы подвода металла в отливку можно расположить в следующий ряд: верхний, комбинированный, нижний (сифонный). При этом, с увеличением скорости заливки, величина деформации стержней уменьшается.

В случае использования нижнего или комбинированного способа подвода металла в отливку следует "раззазоривать" нижние знаки керамического стержня, при верхнем подводе металла в отливку целесообразно "раззазорить" верхний знак.

Во избежание существенной деформации керамического стержня в КО, его изготавливают из материалов с более низким, чем у КО, коэффициентом термического линейного расширения. Например, для КО на основе белого электрокорунда целесообразно использовать керамические стержни на основе алюмосиликатов, циркона или плавленного кварца.

В некоторых случаях небольшой стержень (стержни) простой конфигурации устанавливают в модель после её извлечения из пресс-формы. В таких случаях полости в модели отливки, используемые для установки в них керамических стержней, выполняют постоянными металлическими стержнями в пресс-форме, а "раззазоривания" знаковых частей стержня (стержней) на осуществляют.

Специфика использования как керамических, так и графитовых стержней состоит в том, что выполняемые стержнями полости в отливках механически не обрабатывают и практически ни визуально, ни инструментально не контролируют. Поэтому конфигурация стержней, их размеры и чистота поверхности должны полностью соответствовать чертёжным параметрам внутренних полостей отливки. Эти обстоятельства, в основном, и определяют следующий перечень требований к керамическим стержням:

- высокая размерная точность (стабильность размеров и формы);
- высокая чистота поверхности;



- технологичность в изготовлении, контроле и обработке;
  - достаточная прочность при комнатной температуре;
  - достаточная прочность при длительном воздействии высоких температур;
  - высокая стойкость при теплосменах;
  - высокая термостойкость;
  - химическая стойкость по отношению к сплаву отливки;
  - хорошая удаляемость из отливки;
  - низкая энергоёмкость и минимальная длительность изготовления;
  - высокая химическая активность к щелочам;
  - невысокая стоимость и недефицитность используемых материалов.
- Помимо вышеизложенного, конфигурация стержня не должна образовывать в теле отливки тупиковых полостей, в которые затруднён доступ вещества, используемого для удаления керамического стержня из отливки.

Наибольшее количество керамических стержней, используемых для получения отливок из сплавов с высокой температурой плавления, изготавливают методом высокотемпературного спекания.

Основная сложность изготовления спечённых керамических стержней состоит в их склонности к короблению и трещинообразованию при спекании. Стабильность усадки и деформации керамических стержней на всех этапах их производства и применения предопределяет стабильность качества получаемых отливок. Нестабильность указанных параметров влечёт за собой необходимость увеличения допусков геометрических размеров, как стержней, так и отливок, что, в конечном счёте, понижает точность литья.

Чистота поверхности керамических стержней предопределяет соответственно, и чистоту внутренних поверхностей отливки, сформированных на стержне. Поскольку полости отливки, получаемые с помощью керамического стержня, механически не обрабатывают, то получение этих поверхностей с высокой чистотой поверхности является одной из важнейших задач изготовления стержней.

Дело в том, что от чистоты поверхности отливки зачастую зависят эксплуатационные характеристики того или иного изделия в целом. В частности, высокий класс чистоты поверхности внутренних каналов охлаждения турбинной лопатки – условие обязательное и необходимое для достижения расчётного режима её работы.

Керамические стержни в технологическом цикле производства литья, с момента изготовления модели отливки до окончания затвердевания металла в КО, испытывают самые разнообразные нагрузки. Поэтому от керамических стержней требуется определённый уровень прочности, как при комнатной температуре, так и при повышенных температурах.

Первое силовое воздействие (изгибающие и крутящие усилия) керамический стержень испытывает со стороны модельного состава в период его запрессовки в пресс-форму. В некоторых случаях возникающие напряжения в стержне могут быть настолько велики, что приводят к деформации стержня или его поломке. В связи с тем, что прочность спечённого стержня не всегда представляется возможным увеличить до требуемого уровня, то для предупреждения его деформации или поломки следует использовать модельный состав с соответствующими реологическими свойствами, в частности, с высокой текучестью в пастообразном состоянии.

Высокая прочность керамическим стержням необходима и для противостояния напряжениям, которые они испытывают при выплавлении модельного состава из КО. Дело в том, что в процессе выплавления модельного состава интенсивность нагрева стенок модели, находящихся по разные стороны от керамического стержня, не одинакова в силу конфигурационного фактора КО. В связи с этим в начальный период прогрева модельного состава вокруг стержня последний испытывает сжи-

мающие напряжения со стороны расширяющегося модельного состава. В последующий период времени, в связи с неравномерностью прогрева КО, модельный состав на одной из сторон керамического стержня переходит в вязкопластичное состояние, в то время как модельный состав на противоположной стороне стержня находится ещё в твёрдом состоянии и продолжает расширяться, оказывая одностороннее силовое воздействие на керамический стержень. Поэтому с увеличением неравномерности нагрева модельного состава при его выплавлении возрастает вероятность разрушения керамического стержня. В связи с этим, для предупреждения разрушения керамического стержня, выплавление модельного состава из КО необходимо проводить форсированно, обеспечивая одновременность начала расплавления противоположащих стенок модели, окружающих стержень.

При заливке КО металлом, стержни должны выдерживать динамический удар струи заливаемого расплава и не деформироваться до окончания кристаллизации расплава в отливке.

В случае получения отливок с равноосной макроструктурой керамические стержни, помимо динамического воздействия со стороны потока заливаемого расплава, испытывают тепловое воздействие. Нагрев стержня от 950...1000°C до 1400...1450°C сопровождается развитием в нём значительных внутренних напряжений. При определённых условиях эти напряжения могут привести не только к деформации стержня, но и его разрушению.

В случае получения отливок методом направленной кристаллизации керамический стержень, как и КО, перед заливкой имеет температуру, равную температуре заливаемого расплава, в связи с чем и не испытывает существенного теплового воздействия со стороны залитого расплава. Тем не менее, длительное пребывание стержня при высокой температуре (1500...1700°C) в расплаве понижает его прочность и может привести к его деформации, что также является причиной отклонения толщины стенки отливки от номинального размера. Поэтому материал стержня должен обладать достаточно высокой огнеупорностью, причём для отливок, получаемых методом направленной кристаллизации из сплавов с высокой температурой заливки, огнеупорность материала стержня должна быть наивысшей. Кроме того, если сплав отливки достаточно тугоплавко, то материал стержня должен быть химически инертными по отношению к заливаемому сплаву, во избежание образования химического пригара и изменения химического состава сплава в поверхностных слоях отливки, контактирующих с керамическим стержнем.

Термостойкость – способность керамического стержня противостоять разрушению при высоком температурном градиенте по его сечению. Данная способность особенно важна, если КО со стержнем перед заливкой имеет более низкую температуру, чем температура заливаемого расплава. Термостойкость тем выше, чем ниже КТЛР материала стержня и меньше перепад температуры по сечению стержня. В свою очередь, величина перепада температуры по сечению стержня тем больше, чем больше толщина стержня и толщина стенки отливки в области установки стержня, больше длительность течения расплава вдоль стержня при заливке, ниже теплопроводность и выше теплоёмкость материала стержня и т.д.

Стойкость при теплосменах – свойство керамического стержня сохранять свою целостность при теплосменах (термоциклировании КО). Данный параметр важен для стержней, которые совместно с КО проходят двойной нагрев. Например, если технология подготовки КО к заливке предусматривает промывку внутренней полости КО горячей водой, то первый высокотемпературный нагрев стержня (до 950...1050°C) происходит в процессе предварительного прокаливания КО. После предварительного прокаливания, КО вместе с печью охлаждают до комнатной температуры, промывают горячей водой, сушат, в случае необходимости формируют



опорный наполнитель и нагревают повторно, под заливку. В случае, если материал стержня не обладает достаточной стойкостью при теплосменах, то при повторном нагреве может произойти разрушение стержня.

Стойкость при теплосменах, в основном, зависит от огнеупорности материала керамического стержня и величины его коэффициента термического линейного расширения (КТЛР). При всех прочих равных условиях, наибольшей стойкостью при теплосменах обладают стержни, имеющие наименьший КТЛР и наибольшую огнеупорность.

Немаловажным параметром керамических стержней является пористость их материала. Наличие пор в материале стержня, с одной стороны, понижает его прочность и огнеупорность, с другой – способствует ускорению процесса удаления стержня из отливки. Кроме того, наличие пористости в материале стержня способствует уменьшению напряжений в отливке, возникающих в период её формирования в КО, поскольку стержень с большей пористостью обладает большей податливостью.

То есть, задавая определённой величиной пористости для того или иного материала стержня, следует находить разумный компромисс между прочностью и удаляемостью стержня.

Наиболее заметное понижение прочности у спечённого стержня, при постоянной величине пористости, наблюдается не при увеличении количества пор, а при увеличении их размеров. Поэтому для получения спечённых стержней с заданным уровнем прочности, при большей величине пористости, следует использовать в керамической массе более мелкодисперсные порошки огнеупорных материалов. Применение порошков более мелких фракций позволит не только повысить прочность стержней при низких температурах, но и повысить чистоту поверхности стержня. В то же время необходимо учитывать, что с понижением фракции используемых порошков уменьшается термостойкость стержня.

С целью снижения деформации керамического стержня, вызванной механическим воздействием на стержень со стороны КО, при выборе материала стержня необходимо придерживаться примерного равенства КТЛР материала КО и стержня.

Прочность керамических стержней при длительном воздействии на них высоких температур является одним из основных показателей их качества. Недостаточно высокая прочность стержней при 1300...1500°C приводит к их деформации и несостоятельности толщин стенок изготавливаемых отливок чертёжным размерам. В то же время чрезмерно высокая прочность стержней повышает опасность появления трещин на внутренних поверхностях отливок вследствие низкой податливости стержней. Кроме того, чем прочнее стержень, тем сложнее удалить его из отливки.

Производство отливок методом направленной кристаллизации требует от стержней определённой прочности, стабильности конфигурации и размеров при высоких температурах (1350...1600°C). В связи с этим керамические стержни должны иметь определённую высокотемпературную прочность, поскольку от температуры начала деформации материала стержня зависит предельная температура его службы.

Удаляемость из отливки – способность стержня разупрочняться в среде щелочей, под воздействием вибрации, динамической нагрузки и т.д. Чем меньше времени и энергетических затрат требуется для удаления стержня из отливки, тем, при всех прочих равных условиях, выше удаляемость стержня. Удаляемость из отливки – один из важнейших показателей технологичности керамического состава, который в ряде случаев становится своеобразным "камнем преткновения" на пути его использования в производстве. По сути, с точки зрения удаляемости из отливки, идеальный керамический состав после охлаждения отливки до комнатной температуры

должен разупрочниться до состояния, позволяющего ему свободно высыпаться из внутренних полостей отливки.

Из вышеизложенного следует, что требования к уровню свойств керамических стержней определяются технологией получения отливки и требованиями к качеству отливки. В частности, требования к свойствам керамических стержней, используемых для изготовления отливок турбинных лопаток из жаропрочных никелевых сплавов, в КО, изготовленных на основе белого электрокорунда, приведены в табл. 4.2 [99].

Таблица 4.2  
Требования к керамическим стержням, используемым для получения турбинных лопаток из жаропрочных никелевых сплавов

Основные свойства материала керамических стержней	Литьё с равноосной макроструктурой	Литьё с направленно-столбчатой макроструктурой	Монокристаллическое литьё
Огнеупорность, °С, не менее	1600	1650	1700
Стойкость к действию жидкого металла отливки	Химическая инертность		
Усадка при спекании, %, не более	1	1	0,8
Открытая пористость, %	38–42	33–38	33–38
$\sigma_{\text{сж}}$ , МПа, при температуре: 20°C 1400°C 1500°C	12–16 2,5–4,0 –	15–20 8,0–10,0 2,5–3,0	18–25 – 3,0–3,5
Температура начала деформации под нагрузкой 0,2 МПа, °С	1450–1480	1550–1570	1580–1600
КТЛР, 10 <sup>6</sup> , 1°C (t=20–1200°C)	4,5–8,5	8,5–8,7	9,0–10,0
Точность геометрических размеров получаемых стержней, мм	± (0,1–0,15)		
Шероховатость поверхности,	R <sub>a</sub> = 2–5 мкм		
Способ удаления керамического стержня из отливки	В растворах щелочей (открытая ванна или автоклав низкого давления) или ГДУ	В растворах щелочей (автоклав высокого давления), ГДУ или расплавах фтористых солей.	

Примечание. ГДУ – гидродинамическая установка.

**Изготовление керамических стержней.** Как было отмечено выше, керамические стержни изготавливают самыми разнообразными способами. В настоящее время, наибольшее количество керамических стержней изготавливают путём спекания порошкообразных огнеупорных материалов.

**Спечённые керамические стержни.** Спекание – следствие переноса вещества, происходящее в несвязанной поликристаллической системе, в результате изменения поверхностной энергии в различных частях этой системы.

Известны следующие механизмы спекания мелкодисперсных (тонкоизмельчённых) материалов: диффузионный (твёрдодиффузионный); жидкостный; испарения и кон-



денсации, пластической деформации; реакционной (самораспространяющийся в зависимости от температуры синтеза).

В производстве керамических стержней спекание, в основном, проходит по диффузионному механизму, реже – по жидкостному механизму. Как правило, в производстве керамических стержней, из-за наличия неконтролируемых примесей, спекание по какому-либо одному механизму в "чистом" виде не происходит и носит смешанный характер, например, твёрдожидкостный. При этом доля спекания по жидкостному механизму, в общем процессе, невелика. Тем не менее ввод специальных добавок в керамическую стержневую смесь может значительно увеличить долю жидкофазного спекания в общем процессе.

**Диффузионное спекание.** Диффузионное спекание сопровождается переносом вещества между соседними частицами огнеупорного вещества при отсутствии жидкой фазы.

То есть в процессе нагрева у тонкоизмельчённых, соприкасающихся между собой кристаллических частичек, различающихся величиной свободной энергии, происходит перенос вещества. Как и у любой другой термодинамической системы, стремящейся к выравниванию уровней энергии, перенос вещества между частицами происходит в направлении от частиц с большей свободной энергией (частиц большего диаметра) к частицам с меньшей величиной свободной энергии (частицам меньшего диаметра). Перенос вещества осуществляется за счёт диффузии в местах контакта частиц, в направлении от контактной поверхности к поверхности образующихся перемычек. При спекании происходит сближение частиц, характеризующее общей усадкой системы, что схематично представлено на рис. 4.4, где на рис. 4.4 а изображено исходное состояние элементарной системы, состоящей из двух отдельных частиц сферической формы, а на рис. 4.4 б – состояние системы после спекания.

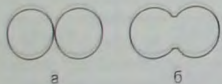


Рис. 4.4. Схема диффузионного спекания частиц

Основными показателями процесса диффузионного спекания являются скорость и степень спекания. Скорость и степень спекания зависят от ряда факторов, основными из которых являются: температура и продолжительность спекания, размер и форма спекаемых частиц, коэффициент диффузии вещества.

Скорость спекания возрастает с повышением температуры и увеличением дисперсности спекаемого материала (уменьшения размера частиц).

Кoeffициент диффузии определяется природой спекаемого материала и, в определённой степени, зависит от дефектности кристаллической решётки его частиц.

С увеличением дефектности кристаллического строения частиц спекаемого вещества коэффициент диффузии увеличивается. Поэтому порошки, частицы которых имеют кристаллическую решётку с большим количеством дефектов кристаллического строения, спекаются значительно энергичнее (активнее). В связи с этим скорость спекания можно повысить путём ввода в спекаемый материал небольшого количества добавок, увеличивающих во время спекания дефектность кристаллической решётки частиц спекаемых материалов.

Степень спекания, кроме вышеперечисленных факторов, также зависит от длительности спекания и плотности укладки (улаковки) частиц в спекаемом материале (формы частиц спекаемого материала). С увеличением этих параметров степень спекания возрастает. Соответственно, с увеличением степени спекания уменьшается пористость изделия и возрастает его прочность.

Следует отметить, что, при всех прочих равных условиях, наибольшей прочностью обладают керамические стержни, для изготовления которых использован ПМ с округлой формой частиц. При этом предел прочности на статический изгиб спечённых керамических стержней, изготовленных из ПМ с округлой формой частиц, превышает на 20...100% аналогичный показатель керамических стержней для изготовления которых использован ПМ с остроугольной (осколочной) формой частиц.

**Жидкостное спекание.** Жидкостное спекание частиц ПМ реализуется с участием жидкой фазы, для чего к основному огнеупорному ПМ добавляют более легкоплавкое стекловидное вещество. При жидкостном спекании химического взаимодействия между жидкой фазой и твёрдыми частицами ПМ не происходит. Поэтому при повышении температуры легкоплавкое вещество переходит в жидкое состояние и, обволакивая твёрдые частицы ПМ и заполняя поры между ними, склеивает их. Модель спекания по данному механизму схематично представлена на рис. 4.5.

На рис. 4.5, а изображено исходное состояние элементарной системы, где легкоплавкое вещество (на рисунке зачернено) находится в смеси в виде наиболее мелких частиц. На рис. 4.5, б представлена схема конечного состояния данной системы, после спекания, когда частицы легкоплавкого вещества, расплавившись, создают перемычку (шейку) на стыке двух смежных твёрдых частиц.

При спекании по жидкостному механизму лимитирующими факторами процесса являются: поверхностное натяжение на границе жидкой и твёрдой фазы, вязкость жидкой фазы, дисперсность (размер) кристаллических частиц ПМ.

В процессе жидкостного спекания, как и в случае твёрдофазного спекания, происходит усадка изделия (стержня). В данном случае усадка изделия происходит из-за того, что под влиянием сил поверхностного натяжения происходит сближение центров смежных частиц ПМ, сопровождающееся общей усадкой рассматриваемой системы [130], равной  $\Delta l$ :

$$\Delta l = \frac{0,75 \cdot \sigma \cdot r \cdot l}{\eta \cdot r} \quad (4.1)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение;  $l$  – расстояние между смежными частицами до спекания;  $t$  – время;  $\eta$  – вязкость жидкой фазы;  $r$  – радиус частиц ПМ.

Другой схемой жидкостного спекания является процесс, сопровождающийся химическим взаимодействием между жидкой и твёрдой фазами системы, что схематично представлено на рис. 4.6. В исходном состоянии (см. рис. 4.6, а), как и в предыдущем случае, легкоплавкое вещество находится в виде несвязанных частиц. В процессе спекания легкоплавкое вещество переходит в жидкое состояние. Образовавшаяся жидкая фаза частично растворяет зёрна кристаллического огнеупора (см. рис. 4.6, б), насыщаясь растворённым веществом, и образует перемычку между смежными частицами ПМ из расплава эвтектического состава. Под влиянием сил поверхностного натяжения образовав-

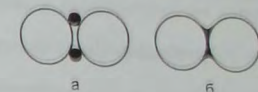


Рис. 4.5. Схема спекания по жидкостному механизму без образования эвтектического сплава

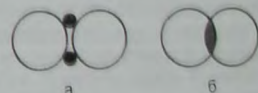


Рис. 4.6. Схема спекания по жидкостному механизму с образованием эвтектического сплава



сящая жидкая фаза вытягивается из зоны контакта частиц наружу, что влечёт за собой стягивание (сближение) твёрдых частиц друг к другу, вызывая усадку изделия. Таким образом, реализуя вышеописанные механизмы спекания, в промышленных условиях, получая спечённые керамические стержни с самыми различными технологическими и физико-механическими свойствами.

Как было отмечено выше, подавляющее количество керамических стержней получают методом твёрдофазного спекания. Обобщённая схема технологического процесса изготовления керамических стержней методом твёрдофазного спекания представлена на рис. 4.7.

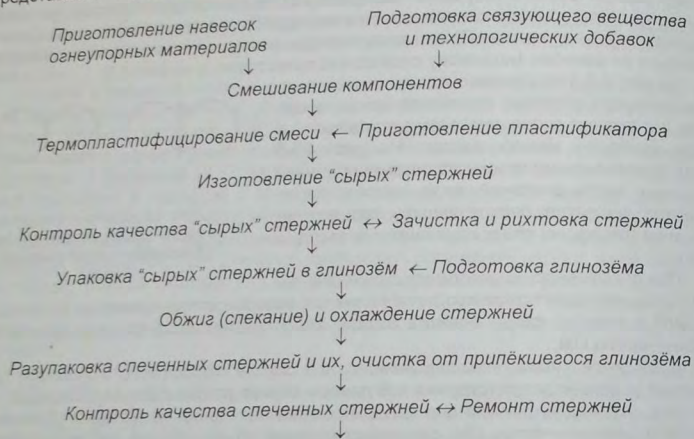


Рис. 4.7. Обобщённая схема технологического процесса изготовления керамических стержней методом твёрдофазного спекания

В настоящее время для получения отливок из жаропрочных никелевых сплавов наибольшее распространение получили спечённые керамические стержни, изготовленные на основе белого электрокорунда. Для стальных отливок, спечённые керамические стержни изготавливают преимущественно из керамических смесей, приготовленных на основе кварца кристаллического пылевидного. На некоторых предприятиях, относительно толстостенные керамические стержни изготавливают из плавящего кварца, стабилизированного цирконием, либо используют керамическую смесь, состоящую, например, из порошков (по массе) кварца (18...20%), белого электрокорунда (38...40%) и цирконового концентрата (40...44%).

**Материалы для изготовления спечённых керамических стержней.** Материалы, входящие в состав керамических смесей, классифицируют на основные и вспомогательные. К числу основных материалов относят тонкоизмельчённые огнеупорные материалы, а также связующие и спекающие добавки. К числу вспомогательных материалов относят специальные добавки, придающие керамическому стержню определённые технологические свойства, необходимые для его изготовления на различных этапах производства.

**Огнеупорные материалы.** Огнеупорные материалы делят на группы по степени огнеупорности, а также по минералогическому и химическому составу.

- По степени огнеупорности материалы делят на следующие группы.
1. Огнеупорные (температура плавления 1580...1770°C) – шамот, каолин, кремнезём.
  2. Высокоогнеупорные (температура плавления 1770...2000°C) – алюмосиликаты высокоглинозёмистые, корунды (плавленый и природный).
  3. Высшей огнеупорности (температура плавления более 2000°C) – CaO, MgO, ZrO<sub>2</sub> и др.

По минералогическому и химическому составу огнеупорные материалы делят на группы: силикаты, алюмосиликаты, корунды.

Основными требованиями к огнеупорным материалам, используемым для изготовления спечённых керамических стержней, являются: огнеупорность – свойство материала противостоять воздействию высоких температур;

химическая стойкость – свойство, определяющее возможность применения материала в контакте с другими огнеупорными материалами, газовыми средами и расплавленными металлами;

термическая стойкость – свойство материала выдерживать без разрушения неоднократное, быстрое изменение температуры;

термическое расширение – показатель изменения линейных и объёмных размеров материала при изменении температуры.

Огнеупорность материала зависит от его природы, а также природы и количества примесей, содержащихся в материале. Как правило, присутствующие в огнеупорном материале примеси, даже в малых количествах, приводят к снижению его огнеупорности. Это связано с тем, что при высоких температурах примесь вступает в химическое взаимодействие с материалом основы огнеупора, образуя легкоплавкие химические соединения. В качестве примера в табл. 4.3 приведены температуры плавления эвтектик некоторых бинарных окисных систем (по П.П. Будникову).

Таблица 4.3

Температуры плавления эвтектик бинарных систем огнеупорных материалов (°C)

Оксид	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2050	1400	1930	1545	1720	1700
CaO	1400	2570	2300	1440	1420	2200
MgO	1930	2300	2800	1540	1600	1500
SiO <sub>2</sub>	1545	1440	1540	1710	1540	1675
TiO <sub>2</sub>	1720	1420	1600	1540	1830	1750
ZrO <sub>2</sub>	1700	2200	1500	1675	1750	2700

Понижение температуры плавления основного вещества (растворителя) в присутствии небольшого количества примеси (растворённого вещества) определяют по уравнению [130]:

$$\Delta T = T - T_p = \frac{x \cdot R \cdot T^2}{23900 \cdot M \cdot Q}, \quad (4.2)$$

где  $T$  – абсолютная температура плавления чистого компонента (растворителя), К;  $T_p$  – абсолютная температура плавления образовавшегося раствора, К;  $x$  – концентрация примеси в растворе (в г на 100 г растворителя);  $R$  – газовая постоянная;  $M$  – молекулярная масса растворённого вещества, г;  $Q$  – скрытая теплота плавления материала-растворителя, Дж/г.



Показатель огнеупорности материала, содержащего примеси, является производной характеристикой показателя его химической стойкости.

Химическая стойкость огнеупора определяет возможность его использования в контакте с другими материалами и средами. Как правило, огнеупоры устойчивы (инертны) в условиях сухого воздуха и окислительной среде. В случае работы в восстановительной среде, при наличии углерода, инертность огнеупоров резко понижается либо вовсе исчезает. В этом случае устойчивость окислов (ПМ) определяется величиной свободной энергии, которая была затрачена на их образование.

По отношению к жидкому металлу (стали, никелевым сплавам и т.п.) химическая стойкость высокоогнеупорных окислов убывает в следующем порядке: MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, BeO и т.д.

Как было отмечено выше, в настоящее время для изготовления керамических стержней наибольшее распространение получил белый плавленый корунд (белый электрокорунд), в меньшей степени – циркон и кварц. Из известных огнеупорных материалов белый электрокорунд наиболее полно отвечает требованиям, предъявляемым к огнеупорным материалам, используемым для производства спеченных керамических стержней, работающих в условиях высоких температур и вакуума.

Белый электрокорунд получают на специализированных предприятиях в результате плавления глинозёма высокой чистоты в электропечах. Основу белого электрокорунда составляет α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (не менее 99%, по массе). Основными примесями белого электрокорунда являются: (0,02...0,05%) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (0,10...0,25%) SiO<sub>2</sub>, (0,2...0,5%) Na<sub>2</sub>O, (0,1...0,2%) С.

В результате помола и распада белый электрокорунд разделяют на четыре класса. Классы порошка белого электрокорунда приведены в табл. 4.4.

Для производства спеченных керамических стержней, в основном, используют шлифпорошки № 5, № 6, № 10... № 12 (размер зерна 5, 6, 10...12 мкм соответственно) и микропорошок № 20 (размер зерна 0,20 мкм).

Спекающие добавки. Спекающие добавки в керамическую смесь вводят в период её приготовления, для снижения температуры спекания (обжига) керамических смесей и повышения термостойкости керамических стержней.

Термостойкость керамических стержней, изготовленных на основе белого электрокорунда, повышают путём увеличения размеров спеченных зёрен корунда в стержне, для чего в стержневую смесь вводят порошки подготовленного глинозёма и TiO<sub>2</sub>.

Количество и тип спекающей добавки, используемой в той или иной керамической смеси, зависит от условий работы керамического стержня. В частности, в керамических стержнях на основе белого электрокорунда, используемых для получения отливок с равноосной макроструктурой из жаропрочных никелевых сплавов, в качестве добавки, понижающей температуру спекания, используют двуокись кремния. Двуокись кремния вводят в керамическую смесь в виде порошка плавленого или кристаллического кварца, либо карбида кремния (SiC). Использование SiO<sub>2</sub> в составе керамической смеси позволяет не только понизить температуру спекания до 1300...1350°C, но и существенно улучшить удалимость стержней из отливок.

При вводе в электрокорундовую смесь карбида кремния (SiC) появление SiO<sub>2</sub> в спекаемом стержне происходит в процессе его обжига в окислительной атмосфере, когда SiC, взаимодействуя с кислородом воздуха, образует SiO<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>. Следует

отметить, что окисление SiC и образование SiO<sub>2</sub> в процессе спекания стержня сопровождается увеличением его объёма. Это увеличение объёма позволяет компенсировать общую усадку стержня при обжиге и, в случае необходимости, довести её до нуля.

По сравнению с плавленым или кристаллическим кварцем, карбид кремния, превращаясь в двуокись кремния в процессе обжига керамическим стержнем, печивает наивысшую температуру начала его деформации. При этом содержание SiC в керамических смесях ограничивают 2,5% (по массе).

Для керамических стержней, работающих в условиях направленной кристаллизации отливок из жаропрочных никелевых сплавов, в качестве спекающей добавки используют активный оксид алюминия.

**Вспомогательные материалы.** В число вспомогательных материалов, используемых для изготовления керамических стержней, входят: пластификатор; выгорающие (порообразующие) добавки; адсорбент (например, технический глинозём); пропитки, упрочняющие спеченный стержень и пр.

Использование пластификатора в керамической смеси предопределяется технологией изготовления спекаемых стержней. Стержневую смесь пластифицируют в том случае, если технология изготовления спеченных стержней предполагает их изготовление из их прототипов – “сырых” стержней, изготавливаемых методом запрессовки в пресс-форму расплавленного шликера.

Пластификатор в керамических смесях используют с целью обеспечения пластичности керамической смесью (шликером, стержневой массой) рабочей полости пресс-формы, придания формы и “сырой” прочности керамической стержню. В качестве пластификатора наиболее часто используют сплав парафина (85%, по массе) и полиэтилена высокого давления низкой плотности (15%). Температура плавления данного пластификатора определяется температурой плавления кристаллической основы шликера (парафина) и находится в пределах от 55 до 62°C. Температура вязкопластичного состояния сплава находится в пределах от 60 до 90°C, свободная линейная усадка ~2,5%. Пластификатор, содержащий полиэтилен, как самостоятельный материал склонен к образованию значительных утяжин, обладает высокой прочностью на изгиб (σ<sub>изг</sub>>6 МПа) и обеспечивает теплоустойчивость “сырых” стержней до 45°C.

Содержание пластификатора в стержневой массе, как правило, составляет 10...17% (по массе). Этого количества пластификатора вполне достаточно для обеспечения заполнения рабочих полостей пресс-формы путём запрессовки керамического шликера в пресс-форму под давлением 1,0...2,5 МПа и температуре 60...130°C. Увеличение содержания пластификатора в шликере повышает его текучесть и позволяет понизить давление запрессовки шликера в пресс-форму. С другой стороны, увеличение доли пластификатора приводит к нестабильному качеству стержней (повышенная усадка, коробление, утяжины, трещины, повышенная осыпаемость и пр.).

На рис. 4.8 представлена зависимость изменения некоторых свойств шликера от содержания в нём пластификатора. Анализ хода кривых, представленных на рис. 4.8, показывает, что с увеличением содержания пластификатора в шликере резко понижается вязкость шликера и увеличивается его текучесть. Вместе с этим, с увеличением содержания пластификатора повышается степень расслаивания шликера в жидком состоянии и возрастает усадка, что резко дестабилизирует качество спеченных керамических стержней.

В качестве порообразующего вещества, позволяющего увеличить пористость спеченного керамического стержня, используют, как правило, графитовую пыль (коллоидный графит) – добавку, выгорающую при спекании стержня. Как правило, в

Таблица 4.4  
Классы порошка белого электрокорунда

Класс	Размер зерна, мкм
Шлифзерно	16-200
Шлифпорошок	3-12
Микропорошок	0,20-0,63
Тонкий порошок	0,05-0,10



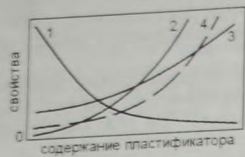


Рис. 4.8. Зависимость свойств шликера от содержания в нём пластификатора: 1 – вязкость; 2 – текучесть (линейная способность); 3 – расплавление; 4 – усадка

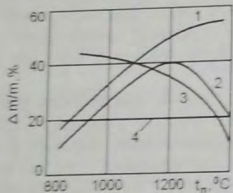


Рис. 4.9. Зависимость относительного количества удаленного пластификатора из керамического стержня от типа упаковочного материала и температуры его предварительного обжига

дует, что лучшей адсорбционной способностью, из числа исследованных материалов, обладает технический глинозём 1, предварительно обожжённый при температуре 1200...1350°C и магnezия 3, предварительно обожжённая при 900°C. Адсорбционная способность каолина 2, в зависимости от температуры предварительного обжига, носит экстремальный характер, достигая своего максимального значения при 1200°C. В то же время адсорбционная способность талька 4 наиболее низкая и не зависит от температуры его предварительного обжига.

Технический глинозём ( $\gamma$ - $Al_2O_3$ ) производят, в основном, путём прокаливания искусственного гидрата глинозёма –  $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ . Технический глинозём представляет собой порошок белого цвета с огнеупорностью около 2000°C и плотностью 3470 кг/м<sup>3</sup>. Частицы технического глинозёма, полученного искусственным путём, представляют собой сферолиты диаметром от 20 до 70 мкм. При нагреве до 1200°C  $\gamma$ - $Al_2O_3$  монотонно переходит в устойчивую форму  $\alpha$ - $Al_2O_3$ , уменьшаясь в объёме на 17% и увеличивая плотность до ~4010 кг/м<sup>3</sup>.

Перед использованием в качестве упаковочного материала технический глинозём прокаливают в течение 2...4 ч при температуре, превышающей температуру обжига стержней на 50...100°C. Прокаливание глинозёма стабилизирует его свойства, снижает удельную поверхность и содержание в нём окислов щелочных металлов

состав стержневой смеси вводят до 8% (по массе) графитовой пыли. При этом следует помнить, что с увеличением содержания в стержневой смеси графитового материала обожжённого стержня, но и повышается его усадка при спекании, а также понижается прочность. Причём, в зависимости от количества введённого порообразователя, снижение прочности спечённого стержня может достигать 50% от величины его прочности без порообразователя, а величина линейной усадки может повыситься в 2...2,5 раза.

Спекание стержней проводят в засыпке огнеупорного ПМ, обладающего, прежде всего, требуемой величиной огнеупорности, низким КТЛР, соответствующим фракционным составом и высокой адсорбционной способностью.

Из числа наименее дефицитных и наименее дорогостоящих материалов вышеперечисленным требованиям наиболее полно отвечает технический глинозём. Использование технического глинозёма как материала для упаковки "сырых" керамических стержней, прежде всего обусловлено его высокой адсорбционной способностью, что особенно важно в период удаления пластификатора из "сырого" керамического стержня во время его нагрева при спекании.

На рис. 4.9 представлена зависимость относительного количества удаленного пластификатора из керамического стержня от типа упаковочного материала (засыпки) и температуры его предварительного обжига (П.О. Грибовский). Из зависимостей, представленных на рис. 4.9, сле-

(см. рис. 4.10, обработка данных [217]), повышает адсорбционную способность и резко понижает брак стержней по короблению, растрескиванию и т.п.

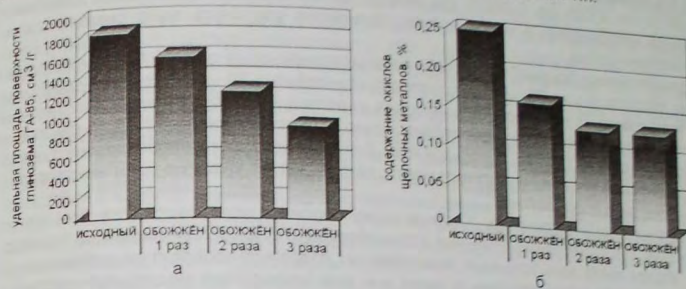


Рис. 4.10. Изменение удельной площади поверхности (а) и содержания окислов щелочных металлов (б) в глинозёме марки ГА-85 (Г-00) от количества циклов обжига при температуре 1380...1430°C

Обжиг глинозёма проводят в муллитокорундовых коробах, например, с внутренними размерами 320×210×125 мм. Для обжига, короб на ¼ его объёма заполняют глинозёмом и вливают в него 6%-ный водный раствор соляной кислоты, после чего заполняют глинозёмом оставшееся свободное пространство в полости короба.

После заполнения глинозёмом короб накрывают тремя кирпичами шамотной лещадки и помещают на 2...4 ч в газовую или электрическую печь с температурой 1350...1400°C.

Водный раствор соляной кислоты, вводимый в глинозём до начала его обжига, предназначен для удаления из глинозёма щелочных металлов, в частности, их окислов. Дело в том, что присутствие окислов щелочных металлов в глинозёме, даже в малых количествах, активно влияет не только на физико-технологические свойства глинозёма как материала-адсорбента, но и на свойства и качество спекаемых в нём керамических стержней.

Количество водного раствора 6%-ной соляной кислоты, используемого на обработку 1 кг глинозёма, рассчитывают по формуле (л):

$$U_{HCl} = 1,5M - 0,32, \quad (4.3)$$

где M – масса окислов щелочных металлов в 1 кг глинозёма, г.

После обжига суммарное содержание окислов щелочных металлов, в пересчёте на двуокись натрия, должно находиться в пределах от 0,08 до 0,12% (по массе).

Необходимо отметить, что при неоднократном использовании глинозёма для спекания стержней, его удельная поверхность непрерывно уменьшается, достигая своего минимального значения после 4...6 циклов повторного использования. Причём после 3-го цикла использования удельная поверхность глинозёма уменьшается на 40...50% от его удельной поверхности в необожжённом состоянии. В основном, уменьшение удельной поверхности глинозёма при обжиге является следствием спекания наиболее мелких частиц, как между собой, так и с более крупными частицами.

Обожжённый (свежеподготовленный) глинозём в дальнейшем, используют для упаковки "сырых" стержней, поступающих на спекание. Как правило, для упаковки "сырых" стержней на основе электрокорунда используют смесь, состоящую из



85...97% оборотного глинозёма и 15...3% свежеподготовленного глинозёма. При этом содержание щелочных металлов в оборотном глинозёме должно находиться в пределах от 0,035 до 0,060% (по массе). Для повышения прочности спечённых стержней необходимо в используемом глинозёме увеличить долю свежеприготовленного глинозёма.

Для улаковки "сырых" стержней, изготавливаемых на основе  $\text{SiO}_2$ , используют смесь, состоящую из 70...90% оборотного глинозёма и 30...10% свежеподготовленного глинозёма. В некоторых случаях для улаковки "сырых" керамических стержней под спекание допускается в оборотном глинозёме использовать 10...15% глинозёма необожженного. В случае использования больших количеств необожженного глинозёма в составе улаковочной смеси наблюдается резкое увеличение брака стержней по трещинам и короблению.

Упрочняющие пропитки. Упрочняющие пропитки используют для повышения прочности тонкостенных спечённых керамических стержней при комнатной температуре. Упрочнение тонкостенных керамических стержней проводят во избежание их разрушения при манипуляциях с ними или при запрессовке модельного состава в пресс-форму.

В качестве пропитки спечённых керамических стержней, например, используют ацетоновый раствор эпоксидной смолы и её отвердителя. Раствор для пропитки готовят путём смешивания 9-ти частей эпоксидной смолы с 1-ной частью полиэтиленамина (отвердителя) и 15-ю частями ацетона. Спечённые керамические стержни погружают в приготовленный раствор на 3...5 мин, после чего извлекают и сушат в вытяжном шкафу в течение 10...20 мин. Полимеризацию (отверждение) эпоксидной смолы, оставшейся в порах керамических стержней, проводят при температуре 120...140°C в течение 40...60 мин [114].

Использование пропитки из вышеуказанных материалов, позволяет повысить прочность спечённых электрокорундовых стержней с 14...15 МПа до 50 МПа (при комнатной температуре). В процессе прокаливания КО полимеризованная эпоксидная смола, оставшаяся в порах керамического стержня, выгорает и, соответственно, прочность керамического стержня понижается.

Для повышения прочности стержней на основе электрокорунда, в качестве упрочняющего вещества также используют смолу K-101 или K4. Упрочняющий раствор на основе указанных смол готовят путём полного растворения 200 г смолы в 800 мл этилового спирта с последующим добавлением в полученный раствор 100мл этилцеллозольва.

Согласно патенту РФ №2232664, с целью повышения прочности, спечённые керамические стержни в течение 5...60 мин выдерживают в растворе следующего состава (% по массе): смола органическая (эпоксидная или полиэфирная) – 8...60, отвердитель (полиэтиленполиамин или перекись бензоила) – 1,2...12, ацетон – остальное. После пропитки стержни сушат при температуре 5...35°C в течение 10...120 мин. По окончании сушки стержни выдерживают в растворе связующего вещества следующего состава (% по массе): кремнийорганический полимер (полиметилфенилсилоксан со структурной формулой  $n[(\text{C}_6\text{H}_5\text{SiO}_{1,5})_n][(\text{CH}_3)_2\text{SiO}_{0,04}]$  или алюминийорганический полимер (полиалюмоксан, со структурной формулой  $\text{CH}(\text{CH}_3)_2(\text{CO}_2)_2\text{AlO}$ ) – 30...75, растворитель органический – остальное. В качестве растворителя органического используют смесь следующего состава (% по массе): спирт этиловый – 25, ацетон – 25, ксилол – 25, толуол – 25. По окончании вторичной пропитки, проводят вторичную сушку стержней в течение 15...100 мин, при температуре 17...290°C.

С целью повышения прочности стержней на основе двуокиси кремния в качестве упрочняющего вещества используют лак КО-815, растворённый в этилцеллозольве

в соотношении 1:1 (по массе). Для пропитки спечённый стержень на несколько минут погружают в раствор лака и, после извлечения из раствора, сушат на воздухе не менее 8 ч или при температуре 80...100°C в течение 45...60 мин.

Для повышения прочности стержней вместо лака, также можно использовать гидролизанный раствор этилсиликата при молярном соотношении  $\text{H}_2\text{O}/\text{OR}=0,7$ . случае необходимости, повторную пропитку в гидролизате проводят не ранее чем через 1 ч, после окончания проведения первой пропитки.

Технология и оборудование для изготовления спечённых керамических стержней. В литье во выплавляемых моделях, в основном, используют монолитные керамические стержни. Монолитные керамические стержни получают как путём запрессовки в пресс-форму пластифицированного шликера с последующим спеканием мической стержневой массы в пресс-форму с её последующим твердением на воздухе или в пресс-форме (стержневом ящике).

В настоящее время, изготовление "сырых" керамических стержней путём запрессовки в пресс-форму нагретого термопластифицированного шликера (метод П.О. Грибовского) с последующим спеканием "сырых" стержней, улакованных в огде для отливки из сплавов с температурой солидуса более 1300°C (стали, никелевые и кобальтовые сплавы и т.п.).

Процесс изготовления "сырых" керамических стержней по методу П.О. Грибовского основан на использовании в спекаемом ПМ термопластичного органического пластификатора. Для этой цели готовят шликер. Как правило, шликер состоит (по массе) из 90...83% твёрдого огнеупорного материала и соответственно, 10...17% пластификатора (сплав парафина и полиэтилена).

В шликере содержится строго дозированное количество пластификатора, поскольку от его количества зависит величина усадки спечённых стержней. С увеличением содержания пластификатора в шликере до 18% (по массе) усадка спечённых стержней повышается незначительно и составляет 1,00...1,25%. С увеличением содержания пластификатора более 18% усадка стержней значительно возрастает и достигает 2,2% при содержании пластификатора 26% [107]. Помимо этого, при содержании пластификатора более 17...18%, наблюдается потеря стабильности качества и прочности спечённых керамических стержней.

Приготовлении шликера начинают с изготовления пластификатора. Для этого навеску парафина расплавляют и доводят температуру расплава до 115...125°C. В расплав парафина, при постоянном перемешивании, порционно вводят полиэтилен, не допуская перегрева расплава выше 125°C. После ввода последней порции полиэтилена мешалку отключают и тщательно вручную смесь перемешивают в течение 2...3 мин, после чего включают механическую мешалку и повышают температуру смеси до 150...160°C. При данной температуре расплав перемешивают в течение 60...80 мин, до полного растворения полиэтилена в парафине и достижения однородности расплава. По окончании перемешивания расплав, процеживая через сито № 016, сливают в противни или водоохлаждаемый поддон, обеспечивая получение в противнях или поддоне слоя расплава толщиной 15...25 мм.

Перед приготовлением шликера проводят подготовку материалов его огнеупорной основы, для чего эти материалы (порошки электрокорунда, кварца и т.п.) предварительно просушивают или прокаливают, с последующим просеиванием через сита с определённой величиной ячейки.

Электрокорунд просушивают при 250...300°C в течение 3...4 ч, в слое толщиной 50...70 мм, используя для этого короба из жаропрочной стали. Просеивают высу-



шленные микропорошки через металлическую проволочную сито. Электрокорунд № 10 – через сито 0315 или 04. Подготовленный электрокорунд хранят в закрытой таре по фракциям.

Подготовка пылевидного кварца заключается в его прокаливании, которое проводят в течение 10...12 ч при температуре 1180...1250°C. Прокалённый и охлаждённый до комнатной температуры пылевидный кварц протирают через сито с ячейкой до 1 мм, после чего проводят его помол, используя шаровую мельницу с ачундовыми или фарфоровыми мелющими телами. Проводя операцию помола, осуществляют не только разделение спёкшихся между собой частиц пылевидного кварца, но и их измельчение.

Степень измельчения ПМ характеризуют удельной площадью поверхности измельчаемого материала. Например, для производства спечённых стержней на основе SiO<sub>2</sub>, как правило, используют порошки с величиной удельной поверхности от 3200 до 6000 см<sup>2</sup>/г. При всех прочих равных условиях, степень помола регулируют его длительностью. С увеличением длительности помола, возрастает степень помола (повышается степень дисперсности вещества). С увеличением дисперсности (степени измельчения) ПМ возрастает межфазная поверхность и изменяются её характеристики, зависящие от способа измельчения материала, происходит изменение кристаллической структуры и энергетического состояния поверхностных слоёв частиц, понижается плотность частиц материала, растёт дефектность структуры, в связи с чем понижается температура спекания материала, увеличивается прочность и усадка спечённого стержня и т.п. [29; 155; 309 и др.]. После помола пылевидный кварц просеивают через сито 016. Подготовленный пылевидный кварц хранят в закрытой таре.

Для приготовления шликера (пластификации стержневой смеси) используют вращающийся конвертор или лопастную мешалку с электрическим нагревом. Процесс приготовления шликера начинают с перемешивания его твёрдых составляющих, для чего, например, в конвертор вводят твёрдые составляющие шликера, ачундовые или фарфоровые мелющие тела (соотношение массы мелющих тел и огнеупорных материалов в конверторе от 1:1 до 1:2). На первом этапе перемешивания температуру в конверторе повышают до 40°C. Длительность первого этапа перемешивания твёрдых составляющих шликера составляет 60...90 мин. По окончании первого этапа перемешивания температуру в конверторе повышают до 130...140°C и продолжают перемешивание в течение 90...120 мин.

Перед вводом в конвертор навеску пластификатора расплавляют и нагревают расплав до 120...130°C. Полученный расплав пластификатора заливают в конвертор и перемешивают в течение 3,5...4,0 ч. В том случае, если в состав шликера входит церезин нефтяной, его предварительно расплавляют и вводят в конвертор через 30...40 мин после ввода расплава пластификатора.

В процессе приготовления шликера, при перемешивании, в него могут быть замешаны пузырьки воздуха. Высокая вязкость приготовленного шликера не позволяет замешанным пузырькам воздуха удалиться из него (всплыть на свободную поверхность шликера), что впоследствии может негативно сказаться на качестве стержней, выраженном, например, в нестабильности прочности стержней или образовании в стержнях утяжин, не подлежащих ремонту. Поэтому с целью удаления воздушных пузырьков в некоторых случаях шликер, по окончании перемешивания, вакуумируют в течение 3...4 мин при температуре 120...150°C. Приготовленный шликер в горячем состоянии отделяют от мелющих тел и разливают тонким слоем (толщина слоя 5...15 мм) по изложницам.

Для изготовления «сырых» стержней используют ручные одноместные стальные пресс-формы. Перед запрессовкой шликера на рабочие поверхности пресс-формы

наносят тонкий слой смазки, например, полиметилсилоксановую жидкость ПМС-30, ПМС-40 или раствор касторового масла с этиловым спиртом в соотношении указанных компонентов 1:1 (по массе). После смазки пресс-форму собирают. Температуру пресс-формы перед запрессовкой, как правило, поддерживают в пределах от 15 до 35°C.

На отечественных предприятиях, как правило, запрессовку шликера в пресс-формы проводят на прессах, например, типа PVE, обеспечивающих номинальное усилие прессования более 100 кН и вертикальный ход поршня не менее 400 мм.

Схема запрессовки шликера на прессе мод. PVE-105 представлена на рис. 4.11. Для запрессовки (см. рис. 4.11) собранную пресс-форму 1 устанавливают на стол пресса 4. На запрессовочное отверстие пресс-формы устанавливают, стальной стакан 2 и заполняют на 0,75...0,95 его объёма расплавленным шликером с температурой 60...130°C. После этого во внутреннюю полость стакана 2 вводят стальной поршень 3 и, надавливая на стальной поршень подвижной плитой пресса, осуществляют запрессовку шликера в пресс-форму. Заливку расплавленного шликера в стакан проводят с помощью электрообогреваемого ковша ёмкостью до 0,3 дм<sup>3</sup>.

При получении некоторых видов стержней используют подвижные электрообогреваемые стаканы, в которых шликер находится при постоянной температуре. Электрообогреваемый стакан представляет собой конструкцию, включающую стационарный поршень, установленный на стол пресса, в верхней части которого размещают электрообогреваемый корпус стакана со съёмным дном, что схематично представлено на рис. 4.12 (на рис. 4.12 обозначены: 1 – стационарный поршень, 2 – электрообогреваемый корпус стакана, 3 – шликер, 4 – пресс-форма, 5 – подвижная плита пресса, 6 – запрессовочное отверстие пресс-формы, 7 – электрические контакты нагревательного элемента стакана, 8 – съёмное дно стакана).

Согласно рис. 4.12 в верхней части стационарного поршня 1 расположен обогреваемый, перевернутый дном 8 вверх стакан 2 со шликером 3. В съёмном дне 8 перевернутого стакана выполнено отверстие 6 для поступления шликера в пресс-форму. Перед запрессовкой стакан заполняют шликером для чего корпус стакана перемещают в крайнее верхнее положение относительно стационарного поршня, снимают дно и наполняют шликером. После этого съёмное дно стакана устанавливают на прежнее место.

Для запрессовки шликера пресс-форму 4 располагают запрессовочным отверстием вниз между подвижной плитой пресса 5 и съёмным дном стакана, совмещая отверстия в съёмном дном стакана и пресс-форме. Поступление шликера в пресс-форму при запрессовке осуществляется за счёт перемещения вниз подвижной плиты пресса, которая приводит к перемещению вниз и пресс-формы, и подвижного стакана. При этом шликер из стакана поступает в рабочую полость пресс-

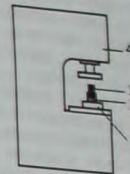


Рис. 4.11. Схема запрессовки шликера на прессе типа PVE: 1 – пресс-форма, 2 – стакан, 3 – поршень, 4 – пресс

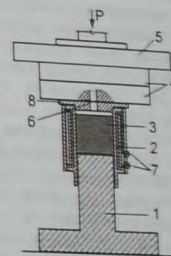


Рис. 4.12. Схема запрессовки шликера в пресс-форму из электрообогреваемого стакана



формы. Длительность выдержки шликера в пресс-форме под давлением составляет 5...30 с. После затвердевания запрессованного шликера пресс-форму разбирают и с помощью съёмника, выполненного индивидуально для каждой пресс-формы, из неё извлекают "сырой" стержень. Извлечённый "сырой" стержень укладывают на поддон или драйер.

Для каждого вида и типоразмера стержня назначают определённый состав шликера и устанавливают индивидуальные технологические параметры запрессовки. В число контролируемых параметров запрессовки входят: температура шликера при запрессовке, удельное давление прессования, длительность выдержки шликера в пресс-форме под давлением, температура пресс-формы. Стабильность указанных параметров запрессовки во многом предопределяет стабильность свойств и размерную точность спечённых стержней.

С целью стабилизации свойств и размерной точности спечённых стержней изготовление "сырых" стержней следует проводить на механизированной установке, обеспечивающей постоянство параметров прессования и однородность шликера от запрессовки к запрессовке. То есть в состав такой установки, помимо гидравлического пресса и холодильной плиты для охлаждения запрессованных пресс-форм, должны входить, например: термостат для разогрева и автоматического поддержания температуры шликера (стержневой массы), гидрозажим для обеспечения смыкания пресс-формы с заданным усилием и т.п.

К числу установок, оснащённых вышеуказанными узлами, относятся, например, шприц-машины фирмы Mercia Mashinery Sales Ltd. (Великобритания) с горизонтальной системой впрыска шликера в пресс-форму.

Основные технические параметры шприц-машины фирмы Mercia Mashinery Sales Ltd. приведены в табл. 4.5, а её общий вид представлен на рис. 4.13.

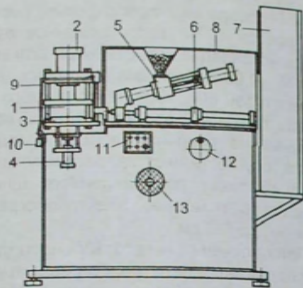


Рис. 4.13. Шприц-машина фирмы Mercia Mashinery Sales Ltd.

Таблица 4.5  
Технические параметры шприц-машины фирмы Mercia Mashinery Sales Ltd.

Параметры	Значения
Максимальное усилие зажима, т	15
Ход зажимной плиты при закрытии, мм	80
Размеры рабочей камеры для пресс-формы, мм	170×215×160
Минимальная высота пресс-формы, мм	80
Регулируемая высота установки сопла, мм	40-80
Ход узла впрыска шликера, мм	200
Производительность пластификации шликера, кг/ч	15
Максимальный объем разового впрыска шликера, см <sup>3</sup>	35
Давление на шликер при впрыске, бар	700
Напряжение питания установки, В	380
Максимальная потребляемая мощность, кВт	20
Расход охлаждающей воды, л/мин	4
Габаритные размеры, мм	1700×1100×1800
Масса, кг	1068

На рис. 4.13 обозначены: 1 - рабочая камера; 2 - зажимной узел; 3 - челночный стол; 4 - выталкиватель; 5 - подготовительная камера; 6 - подвижная система с узлом впрыска шликера; 7 - электрошкаф управления установкой; 8 - защитное ограждение; 9 - защитный кожух челночного стола; 10 - предохранительный клапан защитного кожуха; 11 - дополнительный кнопочный пульт управления; 12 - рукоятка установки высоты оси впрыска; 13 - электродвигатель маслоснабжения.

Как было отмечено выше, в процессе изготовления "сырых" стержней одними из важнейших параметров технологии являются величина давления прессования и время выдержки стержня под давлением.

На рис. 4.14 представлены зависимости предела прочности спечённых керамических стержней при 20°C (1) и 1350°C (3), а также величина их кажущейся плотности 2 от давления прессования "сырых" стержней на основе белого электрокорунда. Кроме того, на рис. 4.14 представлена зависимость влияния давления прессования "сырых" стержней на величину брака спечённых стержней по короблению 4 и трещинам 5, а также влияние на величину брака по короблению длительности их выдержки под давлением в пресс-форме при прессовании 6.

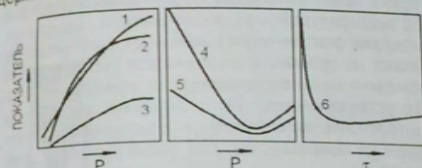


Рис. 4.14. Зависимость прочности, кажущейся плотности и уровня брака спечённых стержней от величины давления прессования "сырых" стержней (P) и брака по короблению от длительности их выдержки под давлением в пресс-форме при прессовании (t)

Анализ зависимостей, представленных на рис. 4.14, показывает, что с увеличением давления прессования "сырых" стержней повышается прочность и плотность спечённых стержней. При этом величина брака спечённых стержней по короблению и трещинам (см. рис. 4.14) с повышением давления прессования понижается, и, достигнув определённого минимума, повышается. То есть при назначении давления прессования "сырых" стержней приходится искать компромиссное решение, которое, с одной стороны, обеспечит необходимую прочность спечённым стержням, с другой - позволит минимизировать потери спечённых стержней по короблению и трещинам.

Длительность выдержки "сырого" стержня под давлением также оказывает существенное влияние на его качество и определяет оборачиваемость пресс-формы.

С увеличением длительности выдержки стержней в пресс-форме понижается общий брак "сырых" и спечённых стержней по короблению. При этом в общем объёме брака "сырых" стержней уменьшается доля стержней с усадочными дефектами и трещинами, но возрастает доля поломанных стержней.

После извлечения из пресс-формы, "сырые" стержни визуально контролируют на предмет наличия недопрессовок, спаев, трещин, наличия воздушных пузырьков, сколов, коробления и т.п., и, при необходимости, стержни зачищают и ремонтируют. Стержни с дефектами, не подлежащими ремонту, бракуют.

Операцию зачистки сырых стержней, как правило, проводят вручную, с использованием специальных ножей, надфилей, ланцета и т.п. Ремонт и зачистка знаковых частей стержней ("сырых" или спечённых) - не допускается.

С целью повышения размерной точности стержней и, соответственно, точности отливки, на некоторых предприятиях зачистку обоя на "сырых" стержнях проводят с помощью лазерного излучателя, оснащённого системами фокусирования и наблю-



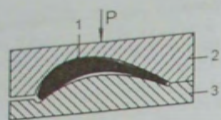


Рис. 4.15. Схема рихтовки "сырых" стержней:  
1 - рихтуемый стержень;  
2 - верхняя часть драйера;  
3 - нижняя часть драйера

дения, трёхкоординатным позиционером с технологической оснасткой и устройством программного управления.

При необходимости (в случае коробления) "сырые" стержни рихтуют в драйере. Схема рихтовки "сырого" стержня в драйере представлена на рис. 4.15.

Рихтовку "сырых" стержней выполняют в драйерах, изготовленных с постоянным упреждением (в сторону, противоположную основному направлению коробления) и с дополнительным упреждением, выполненным с использованием ленты (скотча), требующим периодического обновления при изменении направления или величины коробления.

Рихтовку "сырых" стержней проводят с использованием воздушных или водяных термостатов, оснащённых системой автоматического поддержания температуры. Для обеспечения податливости стержня при его рихтовке на ложементе, стержень на 2...3 мин помещают в термостат с температурой 50...55°C. После определённой выдержки рихтуемый стержень (см. рис. 4.15) извлекают из термостата и укладывают в драйер, установленный на водоохлаждаемом столе. На драйер устанавливают груз массой не менее 3 кг. Длительность выдержки стержня под грузом в драйере - не менее 3 мин. Температура драйера - от 20 до 30°C.

Тираспольский завод литейных машин им. С. М. Кирова производит установку мод. 62661, предназначенную для рихтовки "сырых" стержней сложной конфигурации после прессования и перед подготовкой их к спеканию. Помимо рихтовки, на установке мод. 62661 выполняют упаковку стержней в керамические короба.

Общий вид установки мод. 62661 представлен на рис. 4.16, а её технические параметры приведены в табл. 4.6.

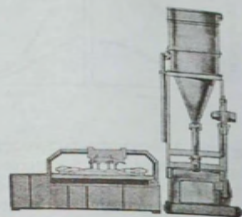


Рис. 4.16. Установка мод. 62661

Таблица 4.6

Технические параметры установки мод. 62661

Параметры	Значения
Производительность (время выдержки в драйере - 3 мин), стержней/ч	280
Габаритные размеры наибольшего обрабатываемого стержня, мм: длина×ширина	250×80
Количество драйеров, шт.	14
Габаритные размеры драйеров, мм: длина×ширина×высота	300×100×100
Габаритные размеры керамического короба для упаковки "сырых" стержней, мм: длина×ширина×высота	315×210×120
Метод рихтовки	Под массой верхней части драйера
Температура воды в ванне нагрева стержней, °C	40-50
Расход сжатого воздуха (при P=0,5 МПа), м³/ч	1,1
Установленная мощность, кВт	8,7
Габаритные размеры, мм: длина×ширина×высота	5900×3680×4490
Масса, кг	5150

Рихтовка тонких протяжённых "сырых" стержней - в ряде случаев операция не-обходимая, позволяющая существенно снизить брак спечённых стержней.

Влияние рихтовки на величину брака спечённых электрокорундовых стержней для турбинных лопаток можно оценить по данным, представленным на гистограмме рис. 4.17 (обработка данных [217]), где чёрным цветом выделен уровень брака спечённых стержней, не прошедших рихтовку в драйере, а белым цветом - уровень брака спечённых стержней, прошедших рихтовку в "сыром" состоянии (цифрами обозначены: 1 - брак по короблению, 2 - брак по слою при расформовке стержней, 3 - брак по слою при зачистке, 4 - брак по трещинам).

Коробление - один из основных устранимых видов дефектов "сырых" стержней и одна из основных причин отбраковки спечённых стержней. Причиной коробления "сырых" стержней является недостаточная выдержка запрессованного шликера в пресс-форме под давлением, низкое давление запрессовки, нестабильная температура в помещении хранения стержней, технологические особенности используемого в шликере пластификатора и его количество, качество подготовки шликера к запрессовке, качество материалов, используемых для изготовления шликера и пр.

Длительность хранения "сырых" стержней - не более 5 суток при комнатной температуре.

При использовании термопластифицированных стержневых смесей следует помнить, что, поскольку основной конструкционной составляющей шликера является легкоплавкий термопластичный материал, то используемый шликер ведёт себя аналогично модельному составу, который содержит повышенное количество твёрдого наполнителя. Поэтому изготовление "сырых" стержней из термопластифицированных стержневых смесей во многом сходно процессу изготовления моделей отливок из модельных составов содержащих твёрдый наполнитель. При этом влияние основных технологических параметров на качество "сырых" стержней, изготовленных из шликера, аналогично влиянию этих же параметров на качество моделей отливок, изготавливаемых из модельных составов с твёрдым наполнителем.

Следующим, после рихтовки, этапом изготовления стержней является их спекание. В технологическом процессе изготовления керамических стержней обжиг является наиболее длительным и энергоёмким этапом технологии. В процессе обжига происходит удаление пластификатора и спекание частиц огнеупорной составляющей стержня в единое целое - поликристаллическое тело.

Для обжига "сырые" стержни упаковывают порошкообразным огнеупорным материалом-адсорбентом, например, подготовленным, техническим глинозёмом. В некоторых случаях для предупреждения "прилипания" глинозёма к поверхности стержней, изготовленных на основе электрокорунда, на стержень наносят противопожарное покрытие (суспензию), изготовленное, например, на основе окиси магния, графита и поливинилбутирала в соотношении компонентов (по массе) 12:6 (0,4...1,0), а также - изопропилового спирта. На "сырые" стержни противопожарную суспензию наносят за 15...20 мин до их упаковки в глинозём.

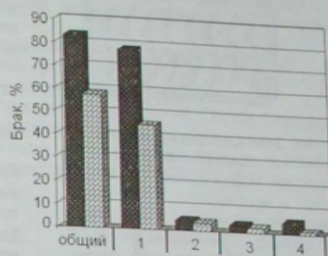


Рис. 4.17. Величина брака спечённых стержней в зависимости от проведения технологической операции их рихтовки в драйере с упреждением



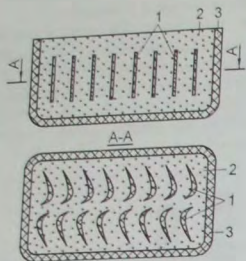


Рис. 4.18. Схема упаковки "сырых" стержней

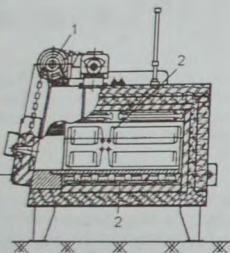


Рис. 4.19. Схема печи СНО-8,5.17.5/10:

1 — механизм подъёма и опускания шибера печи; 2 — нагревательные элементы; 3 — шиберный затвор

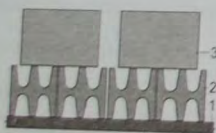


Рис. 4.20. Схема упаковки коробов в печь на профилированные кирпичи: 1 — подина печи; 2 — огнеупорный кирпич; 3 — короб с упакованными стержнями

упаковку "сырых" стержней подготовленным техническим глинозёмом осуществляют в карборундовых (для стержней на основе SiO<sub>2</sub>) или муллитокорундовых (для стержней на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) коробах. При упаковке придерживаются строго определённого пространственного положения каждого вида в коробе. Значительное отклонение положения "сырого" стержня в засыпке от оптимального может привести к короблению или разрушению спечённого стержня, существенному изменению его геометрических размеров и др.

В качестве примера на рис. 4.18 представлена схема упаковки "сырых" стержней (1) в технический глинозём (2) и керамический короб (3).

После упаковки проводят виброуплотнение глинозёма по определённому для каждого вида стержней, режиму, например, при частоте колебаний — 100...150 Гц, амплитуде колебаний — 0,1...0,3 мм и длительности уплотнения — 30...60 с.

На некоторых предприятиях для виброуплотнения глинозёма используют электрические вибраторы, осуществляя, при этом, виброуплотнение при следующих параметрах: амплитуда — 0,15...0,25 мм; частота — 50 Гц; длительность виброуплотнения — 10...30 с.

Режим виброуплотнения подбирают индивидуально для каждого типа стержней, с учётом их габаритов и конфигурации, пространственного положения упакованного стержня в коробе, размеров и формы огнеупорного короба, в котором производят обжиг стержня и т.д.

Упакованные в технический глинозём, "сырые" стержни — спекают. Спекание стержней при температуре 1300...1350°C осуществляют либо в проходных газовых печах типа ППГ-3, либо в камерных электрических печах с селитовыми нагревателями, например, в печах типа KS-2000 (Германия). Обжиг стержней при более низких температурах (до 1000°C) проводят как в вышеупомянутых печах, так и в камерных электрических печах с хромоникелевыми нагревательными элементами, например, печах типа Н, СНО (см. рис. 4.19) и т.п.

С целью снижения брака стержней по короблению, в печах создают условия, обеспечивающие равномерность нагрева спекаемых

стержней. Например, в печах камерного типа используют в качестве подставки под керамические короба огнеупорные кирпичи определённой формы, что схематично представлено на рис. 4.20.

Спекание "сырых" стержней проводят по определённому режиму, назначаемому с учётом природы и свойств материалов, используемых в стержневой смеси, качества спекания стержневой смеси, конфигурационных особенностей и размеров стержня, типа применяемого для спекания оборудования и оснастки, и т.п.

На рис. 4.21 представлены некоторые режимы изменения температуры при спекании электрокорундовых стержней, изготавливаемых с использованием термопластичного пластификатора.

При спекании стержней, изготовленных на основе термопластифицированной стержневой смеси, проходят два основных процесса — удаление из "сырого" стержня пластификатора и спекание между собой частиц ПМ стержневой смеси.

В процессе обжига, в начальный период нагрева (до 55...70°C), упакованный "сырой" стержень теряет прочность и способность сохранять свою форму, поскольку пластификатор стержня размягчается и переходит в вязко-пластичное состояние. С этого момента и до прохождения процесса "прилепания" между собой частиц огнеупорного материала стержня (250...350°C), функционирования пластификатора по сохранению формы и размеров стержня, принимает на себя засыпка (технический глинозём).

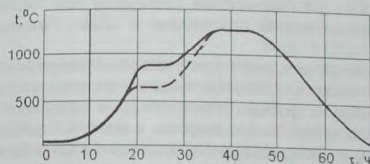


Рис. 4.21. Изменение температуры керамических стержней на основе белого электрокорунда при их обжиге

вместе с тем, при температуре, превышающей 100...115°C, пластификатор начинает интенсивно впитываться в прилегающий к стержню технический глинозём (засыпку). С повышением температуры доля пластификатора, адсорбированного упаковочным материалом, увеличивается. По достижении температуры 140...160°C начинается процесс массопереноса материала пластификатора в пораз засыпки за счёт его испарения, который при 350°C, заканчивается пиролизом (термическим разложением) пластификатора.

Пиролиз пластификатора сопровождается значительным газовыделением, что может вызвать в ещё рыхлом непрочном материале керамических стержней образование трещин, пузырей или их коробление. Поэтому в интервале температур от 55 до 350°C, скорость нагрева стержней должна быть невысокой, обеспечивающей беспрепятственное удаление пластификатора из стержня.

В дальнейшем, скорость повышения температуры стержня можно увеличить, например, до 15...50°C/ч при нагреве до 600...800°C и около 100°C/ч при нагреве от 600...800°C до 1320...1400°C. По достижении максимальной температуры спекания проводят изотермическую выдержку стержней в течение 6...10 ч с последующим охлаждением вместе с печью.

После охлаждения до температуры менее 40°C, спечённые керамические стержни извлекают из засыпки (распаковывают). Для этого, короб с упакованными стержнями устанавливают на сетку распаковочного стола, снимают с короба лещадку и осторожно вытряхивают из короба его содержимое на металлическую сетку с ячейкой 4...6 мм.

Оставшиеся на сетке стержни вручную отделяют от прилипших к ним крупных остатков глинозёма. Очистку стержней от мелких остатков прилипшего глинозёма



проводят на зачистном станке или установке для обдува глинозёма. Остатки облоя на стержнях зачищают с помощью ланцета, щётки, наждачной бумаги, мелкоабразивного круга.

В случае выявления небольших дефектов усадочного характера или мелких поверхностных трещин стержни ремонтируют.

Для ремонта спечённых стержней, изготовленных на основе двуокиси кремния, используют массу, приготовленную на основе электрокорунда и гидролизованного фактного место стержня, убирают излишки суспензии и сушат. Сушку нанесённой массы проводят на воздухе в течение не менее 8 ч или в сушильном шкафу при 80...100°C в течение 45...60 мин, с предварительной выдержкой ремонтируемого стержня на воздухе в течение 15...20 мин.

Для ремонта спечённых стержней на основе электрокорунда готовят суспензию на основе упрочняющей пропитки, содержащей этиловый спирт, смолу К-101 или К4 и тиллцеллозол, а также электрокорунд М5...М7. Соотношение ремонтного раствора и электрокорунда 72:28 (по массе). Приготовленную ремонтную суспензию наносят кисточкой на дефектное место стержня с последующим удалением излишков суспензии с поверхности стержня. После ремонта стержень сушат на воздухе в течение 10...15 мин. При необходимости, для повышения прочности при низких температурах, стержни пропитывают упрочняющими растворами и сушат. Готовые стержни хранят на поддонах.

К числу дефектов, наиболее часто встречающихся в спечённых керамических стержнях, помимо коробления, также относятся: трещины, высокая шероховатость поверхности, повышенная усадка, нарушение формы, поверхностные раковины и т.п. На появление того или иного дефекта в спечённом стержне влияет множество факторов и технологических параметров, в число которых входят: свойства и качество приготовления шликера, гранулометрический состав используемых ПМ, форма зёрен ПМ, состав шликера, состав и количество пластификатора в шликере, условия изготовления и хранения "сырых" стержней, схема укладки "сырых" стержней в короб при упаковке для спекания, удельная площадь поверхности технического глинозёма, способ и качество подготовки глинозёма, содержание в обожжённом глинозёме неподготовленного глинозёма, частота и амплитуда виброуплотнения упаковочного ПМ в коробе, длительность виброуплотнения при упаковке "сырых" стержней, температурный режим спекания стержней и т.п.

На рис. 4.22 представлено влияние некоторых технологических параметров на уровень общего брака спечённых керамических стержней, изготовленных на основе белого электрокорунда и упакованных для обжига в подготовленный технический глинозём.

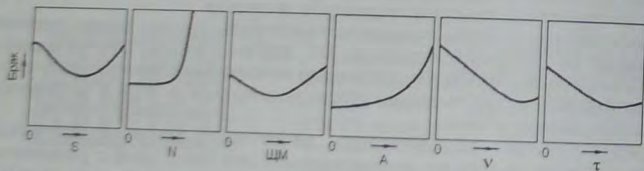


Рис. 4.22. Влияние технологических параметров на уровень общего брака спечённых керамических стержней: S – удельная площадь поверхности глинозёма; N – количество неподготовленного глинозёма, введённого в обожжённый глинозём; ЦМ – содержание окислов щелочных металлов в глинозёме; А – амплитуда вибрации при упаковке "сырых" стержней; V – частота вибрации при упаковке "сырых" стержней; τ – длительность виброуплотнения глинозёма при упаковке "сырых" стержней

Как было отмечено выше, спекание "сырых" стержней сопровождается их усадкой. Величина усадки стержней, а также величина их брака, при всех прочих равных условиях, зависит от фракционного и гранулометрического состава ПМ, используемых в стержневой смеси, количества и равномерности температуры, температуры, месте печи, расположения упакованного стержня в коробе при спекании, количества

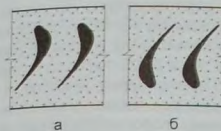


Рис. 4.23. Схемы горизонтального расположения упакованных "сырых" стержней в коробе

В этом отношении показательные результаты исследований, представленные в работе [217], где приведены данные о величине усадки и величине брака стержней для турбинных лопаток в зависимости от пространственного положения упакованного стержня в коробе при спекании (см. рис. 4.23), а также количества упакованных стержней в одном коробе.

Вышеуказанные данные представлены на рис. 4.24 (на его гистограмме указана величина брака стержней при их упаковке под обжиг: 1 – горизонтально, по схеме (а) на рис. 4.23; 2 – горизонтально, по схеме (б) на рис. 4.23; 3 – вертикально в 3 ряда по 12 шт, 4 – вертикально в 2 ряда по 12 шт, 5 – вертикально в 3 ряда по 8 шт, по шаблону).

Из данных, представленных на рис. 4.24, в, следует, что наибольший брак спечённых керамических стержней наблюдался при их горизонтальной укладке в глинозём на выходную (см. рис. 4.23,а) или на входную (см. рис. 4.23,б) кромку (на рис. 4.24 обозначены цифрами 1 и 2 соответственно). При вертикальном положении наименьшая величина брака наблюдалась у стержней (на рис. 4.24 обозначен цифрой 5), для упаковки которых был использован шаблон – приспособление, позволяющее располагать "сырые" стержни при их упаковке в глинозём в строго определённом положении.

Спекание стержней, упакованных в различном пространственном положении, сказывается не только на выходе годного стержней, но и на величине их линейной усадки. При этом величина усадки стержня не одинакова в его различных направлениях и определяется, при всех прочих равных условиях, положением стержня в пространстве во время его спекания. Например, для керамических стержней, изготавливаемых на основе белого электрокорунда, величина усадки при спекании в вертикальном направлении составляет 1,10...1,45%, а величина усадки в горизонтальной плоскости – 0,2...0,4%.

Из вышеизложенного следует, что при расчёте размеров рабочих полостей пресс-форм, используемых для изготовления "сырых" стержней из термопластифицированных стержневых смесей, следует учитывать ещё и предполагаемое пространственное расположение стержня при его спекании.

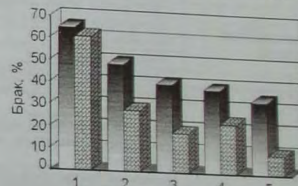


Рис. 4.24. Величина брака спечённых стержней в зависимости от их пространственного расположения при обжиге (спекании):

■ – общий брак;  
 ▨ – брак по короблению



Кроме того, при изготовлении стержней, используемых для получения направленно-закристаллизованных отливок из тугоплавких сплавов, где температура стержня может составлять 1350...1700°C, при расчёте размеров рабочих полостей пресс-форм "сырых" стержней следует учитывать как величину термического расширения стержня, так и его усадку (до 0,8% и более), вызванную дополнительным спеканием материала стержня при повышенной температуре.

Для каждого вида стержней, типа и количества пластификатора в шликере, состава стержневой смеси, подготовленности глинозёма и т.п. значимость перечисленных выше факторов и параметров неравноценна и многофакторно зависима. Поэтому строгое соблюдение технологии изготовления стержней является залогом стабильности их качества. По этой причине в процессе изготовления керамических стержней проводят не только их окончательные операции по взвешиванию навесок исходных материалов, определение дисперсности используемых порошковых огнеупорных материалов, определение влажности используемых порошкообразных огнеупорных материалов и технологических добавок керамической массы и т.п.).

В табл. 4.7 приведен перечень контролируемых параметров технологического процесса изготовления спечённых керамических стержней, а также периодичность контроля данных параметров.

Таблица 4.7

**Контролируемые параметры технологического процесса изготовления спечённых керамических стержней**

Технологическая операция	Контролируемый параметр	Периодичность контроля
Приготовление шликера	Внешний вид	Каждая партия шликера
	Удельная поверхность пылевидных материалов	Каждая партия шликера
	Длительность варки шликера	В процессе операции
	Температура шликера в процессе варки	В процессе операции
	Текучесть шликера	Факультативно
Прессование стержней	Технологическая проба	Каждая партия шликера
	Содержание пластификатора в шликере	Факультативно
	Температура шликера в момент его запрессовки в пресс-форму	Систематически
	Давление прессования шликера	Систематически
Контроль качества "сырых" стержней	Длительность выдержки шликера в пресс-форме под давлением	Систематически
	Начальная температура пресс-формы	В процессе операции
	Внешний вид	Систематически
Рихтовка "сырых" стержней	Качество поверхности	Систематически
	Температура в термостате	В процессе проведения операции
	Длительность выдержки в термостате	В процессе проведения операции
	Длительность выдержки в драйере	В процессе проведения операции
	Геометрия рихтованного стержня	10-15% стержней от партии
Спекание стержней	Соответствие геометрических размеров металлических драйеров и пресс-форм	Факультативно
	Температурный режим в печи	Систематически
Контроль спечённых (обожжённых) стержней	Газовая среда в зоне спекания стержней	Факультативно
	Качество поверхности	100% стержней
	Геометрические размеры	100% стержней
	Предел прочности при изгибе	Каждая партия стержней
	Кажущаяся плотность, открытая пористость, водопоглощение	Факультативно
Температура начала деформации под нагрузкой	Факультативно	

Составы некоторых стержневых масс на основе электрокорунда и кварца, а также свойства спечённых керамических стержней приведены в табл. 4.8 и табл. 4.9 (данные табл. 4.8 и табл. 4.9 заимствованы из работ [153; 217], а также получены автором).

Таблица 4.8

Исходные компоненты	Условный номер стержневой массы								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Электрокорунд №10, №12	81	81	25	25	23				
Электрокорунд № 5, № 6			40	40	20	3			5
Электрокорунд М20	15	15	29	27		20			
Электрокорунд М7						5			
Электрокорунд М63						36			
Двуокись титана	0,9	0,5	1,0	1,0					10
Глинозём Г-00	3	3							
Оксид магния	0,1	0,5							10
Алюминиевый порошок марки АСД-4			5	5		4			
Графит коллоидальный С-1				2					
Бура обезвоженная									1,5
Электрокорунд № 40					50				
Электрокорунд (шлифзерно)					25				
Двуокись циркония					5			92	
Карбид кремния зелёный (М5 или М14)								8	
Латоксид ниобия (верх 100%)								0,05	
НКС (пылевидный)									70-75
НКС (зернистый)									25-30
Кварц пылевидный						9			54
Пластификатор ПП-10	15-16	15-16	14-15	14-15					18-20
Пластификатор ППК*							13		18-20**
Пластификатор ПП-5					10-12				
Пластификатор ППБГ-9***							16-18		
Церезин марки 75 или 80									0,5-1,5

Примечание. \* - состав ППК: парафин - 91,4%, полиэтилен - 5,0%, канифоль - 3,6%, \*\* - сверг 100%. \*\*\* - состав ППБГ: парафин - 84,4%, полиэтилен - 9,0%, бурогольный воск - 5,9%, графит - 0,7%.

Таблица 4.9

**Свойства спечённых керамических стержней**

Свойства	Условный номер керамической массы по табл. 4.8								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Текучесть (литейная способность), мм	83	91	142	145					
Предел прочности при статическом изгибе, МПа:									
	при 20°C	14,4	15,8	28,0	22,0	27			8-12
	при 1350°C	5,6	5,6	8,8	8,0				
при 1500°C						1,4-3,5			
Пористость, %	33	32	33	37	>20	34	>20	>20	>25
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,5	2,5	2,5	2,5		2,5			
Водопоглощение, %	13	12	14	14					
Усадка после спекания, %	0	0,08-0,1	0,7-1,0	1,0-1,2		1,0-1,2	0		
Класс шероховатости поверхности	4-5	5-6	5-6	6-7	3-4	5-6	3-4	3-4	3-4
Температура спекания (обжига), °C	1350-1430	1350-1430	1250	1250	1200	1300-1350	1300-1350	1100	1150-1250



Как было отмечено выше, одним из основных показателей технологичности стержневой смеси является сложность удаления керамического стержня из отливки при выбивке – удаляемость стержней.

Удаление спечённых керамических стержней, изготовленных на основе электрокорунда, процесс весьма длительный и энергоёмкий, что объясняется высокой степенью химической инертности двуокси алюминия (электрокорунда) по отношению к щелочным средам, в которых проводят удаление (выщелачивание) стержней из отливок, и высокой механической прочностью спечённых стержней. Значительно легче из отливок удаляются стержни, изготовленные на основе кварца, обладающего кsilыми химическими свойствами. В этих случаях для изготовления стержней особо ответственных отливок используют плавный кварц, стабилизированный цирконием. В качестве примера такой керамической массы может служить шликер следующего состава (по массе): 37% – кварц плавный с удельной площадью поверхности частиц 5900...6000 см<sup>2</sup>/г, 36,0% – кварц плавный, пылевидный с удельной площадью поверхности частиц 3650...3750 см<sup>2</sup>/г, 13,0% – концентрат цирконовый пылевидный с удельной площадью поверхности частиц ~6000 см<sup>2</sup>/г, 14% – пластификатор ПП-10 (парафин –90% и полиэтилен – 10%, по массе).

В некоторых случаях для изготовления керамических стержней особой сложности используют составные стержни, отдельные (монокристаллические) части которых склеивают высокотемпературной клеевой композицией. Помимо этого, для выполнения составных стержней особой сложности используют "гибкую" керамику (патент РФ № 2126308), представляющую собой листовой либо профилированный керамополимерный материал высокой эластичности. Особенностью данного материала является его высокая податливость, позволяющая гнать сложнопрофильные поверхности без разрушения, фиксировать заданный профиль и переходить в твёрдое состояние при высокотемпературной обработке. Гибкую керамику, например, как дополнительный стержень, используют совместно с монокристаллическим стержнем для выполнения каналов в монокристаллических турбинных лопатках с транспирационной (проникающей) системой охлаждения.

**Безобжиговые (холодотвердеющие) керамические стержни.** Безобжиговые холодотвердеющие керамические стержни изготавливают различными способами, в том числе и по Шоу-процессу. Схема технологического процесса изготовления холодотвердеющих керамических стержней методом Шоу, представлена на рис. 4.25.

По Шоу-процессу для изготовления каждого стержня готовят жидкотекучую суспензию (шликер), состоящую из огнеупорного ПМ и гидролизованного раствора этилсиликата. Прессование стержней (шликера) проводят на пневматических прессах в металлические пресс-формы. Непосредственно перед запрессовкой в приготовленную суспензию вводят (1% от массы ПМ) 15%-ный раствор NaOH или KOH (огеливатель), который обеспечивает твердение запрессованной массы в течение 30...40 с. За это время шликер должен быть запрессован в пресс-форму и выдержан в ней. После этого пресс-форму раскрывают и, не извлекая стержень из одной из полуформ, поджигают его (пары растворителя).

По окончании горения, отвердевший стержень извлекают из полуформы, охлаждают на воздухе до комнатной температуры и пропитывают раствором крепителя, изготовленного на основе этилсиликатного связующего.

Пропитанный стержень просушивают на воздухе, после чего обрабатывают (зачищают), контролируют его качество и передают для изготовления модели.

Состав и свойства некоторых холодотвердеющих керамических стержней, изготовленных по Шоу-процессу, приведены в табл. 4.10 [153].

Таблица 4.10  
**Состав и свойства холодотвердеющих керамических стержней**

Материал	Основа, % (по массе)		Связующий раствор, % (по массе)		Свойства керамического стержня после прокаливания КО			
	Содержание в смеси	Количество твердой составляющей в суспензии	Содержание в растворе SiO <sub>2</sub>	Количество связующего в суспензии	КТЛР при 20=1000 <sup>0</sup> С, 1/С	Кажущаяся пористость, % при 20 <sup>0</sup> С, МПа	Температура начала деформации при 0,4 МПа, <sup>0</sup> С	
НКС (кварц аморфный); пылевидный зернистый	70 30	72–75	16	25–28	2·10 <sup>-6</sup>	~30	5	1250
Дистен-силлиманит; пылевидный зернистый	80 20	79–80	30–35	21–20	10·10 <sup>-6</sup>	~35	6	1300
Электрокорунд белый; М5 или М7 М40 ШЗ № 10	20 50 30	80	20–23	20	10·10 <sup>-6</sup>	~30	6	1400

Керамические стержни, полученные данным способом, имеют низкие прочностные и огнеупорные свойства, большие отклонения по геометрии профиля, низкую чистоту поверхности. Кроме того, процесс характеризуется нестабильностью технологии.

Довольно часто стержни, изготовленные по данной технологии, на поверхности имеют достаточно большие трещины. С целью снижения количества и размеров поверхностных трещин стержень, не извлекая из формы, сушат в вакууме.

Согласно патенту РФ №1543693 для изготовления безобжиговых стержней простой конфигурации можно использовать следующий способ. "Сырой" стержень, изготовленный из термопластифицированной стержневой смеси, упаковывают в глинозём и нагревают до температуры 250...300<sup>0</sup>С для удаления из стержня пластифици-

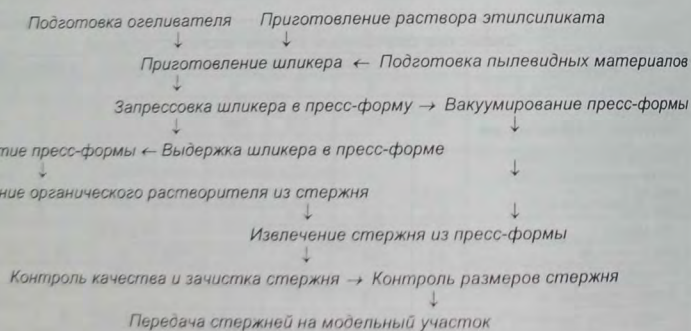


Рис. 4.25. Схема технологического процесса изготовления холодотвердеющих керамических стержней по Шоу-процессу



катора. По окончании определённой изотермической выдержки при указанной температуре стержни охлаждают до комнатной температуры, извлекают из засыпки, очищают от остатков глинозёма и пропитывают кремнийорганическим связующим. Пропитанный стержень сушат на воздухе. В процессе сушки связующее, пропитавшее тело стержня, полимеризуется и способствует его упрочнению.

К числу холоднотвердеющих также относятся гипсовые стержни, используемые для выполнения внутренних полостей отливок, изготавливаемых из сплавов на основе меди, алюминия или магния.

В отличие от высокопрочных спечённых стержней, обожжённых гипсовые стержни обладают значительно меньшей величиной прочности. Это обстоятельство, с одной стороны, является причиной частых поломок тонкостенных стержней, как во время изготовления моделей, так и во время заливки формы расплавом, или появления зазора в отливках, с другой стороны, позволяет из отливки достаточно легко вымывать гипсовый стержень водой или удалить его в результате ударно-вибрационного воздействия на отливку.

Технология изготовления гипсовых стержней аналогична технологии изготовления монолитных гипсовых форм. То есть для изготовления стержня в воду добавляют определённое количество гипса, тщательно перемешивают массу и заливают в стержневой ящик. В некоторых случаях для изготовления стержней используют смеси гипса и пылевидного кварца или тонкомолотого шамота, используя при этом в качестве затворителя водосолевые растворы (например, воду с содержанием 3...5% NaCl).

Перед заливкой гипсовой массой, во избежание прилипания стержня к рабочим поверхностям стержневого ящика, эти поверхности смазывают раствором стеарина или парафина в керосине. После смазывания в стержневой ящик укладывают проволочный каркас, во избежание разрушения стержня в его тонких частях и перемычках, и заливают приготовленную смесь (гипсовую массу).

Затвердение гипсовой массы, залитой в стержневой ящик, происходит в течение 25...30 мин, после чего затвердевший стержень извлекают из ящика и сушат в течение 3...4 ч при температуре 110...120°C. Затем охлаждённый стержень проходит соответствующий контроль, после чего стержень передают в модельное отделение.

Из числа известных гипсовых смесей наиболее широко применяемой является смесь, состоящая из (по массе) 80% высокопрочного гипса марки Г20 или Г28 и 20% асбеста. В некоторых случаях используют менее прочную смесь, состоящую (по массе) из 50% песка, 40% высокопрочного гипса и 10% асбеста. При получении мелких отливок простой конфигурации из легколавких цветных сплавов, для изготовления стержней используют строительный гипс марок Г5 или Г7.

Спустя 24 ч после извлечения стержня из стержневого ящика, стержни обрабатывают паром или просушивают при температуре 60...70°C.

Обработку гипсовых стержней паром проводят в автоклаве, выдерживая стержни в течение 6...8 ч под давлением 1,2...1,5 бар (при более высоком давлении пропаривания стержни из гипсовых смесей резко теряют прочность) с последующей выдержкой пропаренных стержней на воздухе в течение (не менее) 20...24 ч. Пропаривание гипсовых стержней понижает их прочность, однако стабилизирует размерную точность отливок за счёт уменьшения усадки стержней.

В качестве примера в табл. 4.11 приведены данные о прочности образцов, изготовленных из гипса и гипсовых смесей при сжатии, а на рис. 4.26 и рис. 4.27 представлены зависимости величины коэффициента расширения при нагреве (сплошная линия) и усадки при охлаждении (пунктирная линия) стержней, изготовленных из этих же гипсовых масс [291].

Таблица 4.11  
Прочность на сжатие образцов, изготовленных из гипса и гипсовых смесей

Состав смеси, % (по массе)	Прочность на сжатие, МПа	
	после сушки при 60°C / после прокаливания при 600°C в течение 3 ч	после пропаривания и выдержки на воздухе в течение 50 ч / после прокаливания при 600°C в течение 3 ч
Г - 100*	25 / -	5 / -
Г - 80, А - 20	19 / 2,52	4 / 1
Г - 40, П - 50; А - 10	15 / 1,7	1,2 / 0,88

Примечание. \* - Г - гипс, П - песок, А - асбест.

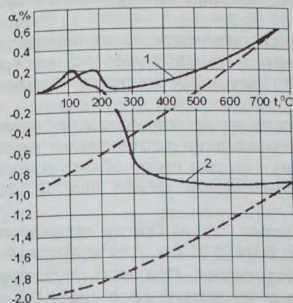


Рис. 4.26. Расширение-усадка пропаренной (1) и непропаренной (2) гипсо-асбестовой смеси, состоящей из 80% - высокопрочного гипса и 20% - асбеста (по массе)

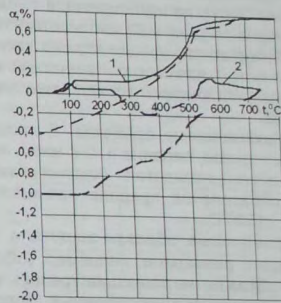


Рис. 4.27. Расширение-усадка пропаренной (1) и непропаренной (2) гипсо-асбестовой смеси, состоящей из 50% - гипса, 10% - асбеста и 40% - высокопрочного гипса (по массе)

Данные, приведенные в табл. 4.11, свидетельствуют о том, что гипсовые стержни обладают весьма низкой прочностью. Поэтому при получении отливок из сплавов на основе меди, с целью повышения прочности, гипсовые стержни в некоторых случаях после сушки или после пропаривания и сушки пропитывают либо кремнезолом, либо жидким стеклом, либо раствором гидролизованного этилсиликата.

Несмотря на очевидные недостатки гипса как материала для изготовления стержней, сам по себе способ изготовления стержней из гипса имеет ряд преимуществ перед спечёнными стержнями (низкая энергоёмкость процесса изготовления, короткий цикл изготовления, хорошая удаляемость из отливки, низкая стоимость используемых материалов и пр.), к числу которых относится возможность установки в тело стержня холодильника для усиления эффекта последовательности затвердевания внутренних тепловых узлов отливки. Для установки холодильника в стержень, его помещают в стержневой ящик, в соответствующее место, после чего стержневой ящик заполняют водо-гипсовой смесью. После заливки и затвердевания гипсовой смеси установленный холодильник остаётся в теле стержня, оформляя часть его поверхности.

Следует отметить, что при изготовлении гипсовых стержней предпочтение следует отдавать смесям с повышенным содержанием гипса, поскольку увеличением содержания гипса в смеси возрастает не только прочность стержня, но и чистота его поверхности.



## 4.2. Методы контроля качества керамических стержней

Качество «сырых» и спечённых керамических стержней, прежде всего, контролируют визуально, пооперационно, в процессе их изготовления, отбраковывая стержни с недопустимыми и неустраняемыми дефектами. Оставшиеся стержни контролируют путём их обмера, используя для этого шаблоны и соответствующие контрольно-измерительные средства.

За рубежом для контроля размерной точности керамических стержней используют оптические приборы (компараторы), проектирующие на экран увеличенные контуры стержней и их сечений. Наиболее совершенным считается компаратор фирмы Blackburn Instruments Ltd. (США), осуществляющий одновременный контроль размеров стержня в 50 контрольных точках [86].

Качество спечённых керамических стержней оценивают по их прочности при статическом изгибе (при комнатной и повышенной температуре), по температуре начала деформации, по величине пористости, кажущейся плотности и водопоглощению.

**Механические свойства.** В процессе изготовления каждой партии керамических стержней, параллельно с ними, по той же технологии изготавливают керамические образцы-свидетели (керамические бруски), которые после обжига используют для определения предела прочности при статическом изгибе при 18...20°C и 1200...1500°C.

Испытуемые образцы-свидетели представляют собой бруски прямоугольного сечения с размерами, например,  $(50 \pm 1) \times (12 \pm 0,3) \times (4 \pm 0,2)$  мм. Для испытаний отбирают образцы, не имеющие трещин, вмятин или сколов. При этом отклонение параллельности противоположных сторон образца не должно превышать 0,2 мм на каждые 10 мм длины. Толщину и ширину образцов замеряют в пяти точках, отстоящих друг от друга на расстоянии не менее, чем 10 мм, с точностью 0,05 мм. Замер длины образца проводят с точностью 0,5 мм.

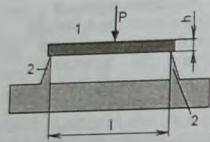


Рис. 4.28. Трёхточечная схема нагружения образца:  
1 – испытуемый образец;  
2 – опоры

Испытания образцов проводят на разрывных или универсальных машинах любой системы с ценой деления шкалы машины не более 24,5 Н и относительной погрешностью измерения не более 1%, при статическом режиме нагружения. Нагружение испытуемого образца при испытаниях на статический изгиб проводят с постоянной скоростью, не превышающей 6 мм/мин, по трёхточечной схеме нагружения образца, что схематично представлено на рис. 4.28.

Предел прочности при статическом изгибе ( $\sigma_{и}$ ) рассчитывают по формуле:

$$\sigma_{и} = \frac{1,5 \cdot P \cdot l}{b \cdot h^2}, \quad (4.4)$$

где  $P$  – разрушающая нагрузка, Н;  $l$  – расстояние между нижними опорами приспособления, м;  $b$  – ширина образца м;  $h$  – высота (толщина) образца, м.

Результаты испытаний округляют до 0,98 МПа. Если разрушение образца произошло на расстоянии более чем 5 мм от линии приложения нагрузки ( $P$ ), то полученные данные не учитывают. Пределом прочности образцов принимают среднее арифметическое значение результатов испытаний восьми образцов.

Высокотемпературные испытания керамических материалов проводят по вышеописанному принципу на аналогичных образцах, но с использованием установок, оснащённых лабораторной печью. Температура испытаний образцов на статический изгиб в этом случае может достигать 1350°C. Если КО заливают в вакууме, то испытания керамических стержней проводят в условиях вакуума. Температура испытания образцов в этом случае может достигать 1600°C, а количество образцов может быть ограничено пятью штуками.

Прочность керамических стержней зависит от большего числа параметров и, при всех прочих равных условиях, повышается с увеличением температуры и длительности спекания, с уменьшением размеров пор в стержнях, со снижением содержания пластификатора в шликере. Прочность и усадка спечённых стержней также зависит от формы и размеров спекаемых частиц. В качестве примера на рис. 4.29 представлены зависимости свойств спекаемой корундовой керамики ( $\sigma_{и}$  – предел прочности при статическом изгибе,  $\alpha$  – свободная линейная усадка керамики,  $ПП_{-10}$  – величина открытой пористости керамики,  $ПП$  – количество пластификатора  $ПП_{-10}$  в шликере) от размера зерна электрокорунда (спекание стержней проводили при 1350°C в течение 10 ч, высокотемпературное связующее – 1%  $TiO_2$ ) [99].

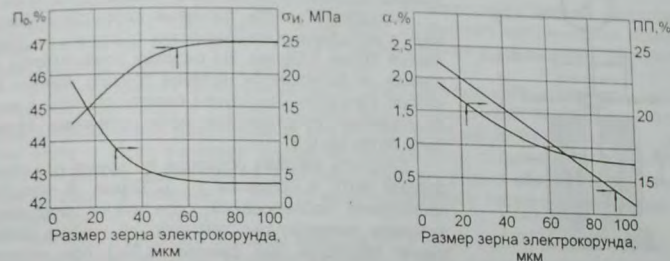


Рис. 4.29. Зависимость свойств корундовой керамики от размера зерна электрокорунда

Анализ зависимостей, представленных на рис. 4.29, свидетельствует, что с увеличением размера спекаемых частиц электрокорунда понижается прочность и усадка спечённой керамики и возрастает величина её открытой пористости, то есть повышается шероховатость поверхности керамического стержня. В связи с этим одной из задач, решаемых при разработке новых составов керамических смесей, является оптимизация их гранулометрического состава, обеспечивающего, с одной стороны, необходимую прочность и шероховатость поверхности керамических стержней, с другой – строго регламентированную усадку при спекании керамического стержня и его наибольшую пористость.

**Температура начала деформации (ТНД).** Данный показатель относится к числу важнейших при оценке свойств керамических стержней, используемых для получения отливок из тугоплавких сплавов методом направленной кристаллизации. Дело в том, что в методе направленной кристаллизации начальная температура КО и, соответственно, стержня в ней достигает 1600...1700°C, в связи с чем в керамике возникают определённые пластические деформации. В свою очередь, возникшие пластические деформации могут привести не только к недопустимым изменениям конфигурации керамического стержня, но и его разрушению. Во избежание этого,



материал стержня должен обладать достаточно высокой ТНД, которая зависит от природы используемой керамики и её фазового состава.

Используемые для изготовления керамических стержней и КО электрокорунд, муллит и кварц обладают достаточно высокой ТНД. В то же время присутствующие в этих материалах примеси при высокой температуре образуют стекловидную фазу и могут значительно понизить величину ТНД спечённой керамики.

Согласно методу определения ТНД, разработанному в ВИАМ, образцы керамических материалов испытывают под нагрузкой при 1700°C. Для испытаний образцы цилиндрической формы устанавливают в специальное приспособление, обеспечивающее создание постоянной нагрузки, приложенной вертикально по всей плоскости испытываемого образца.

Схема установки для определения деформации керамических материалов под нагрузкой при высоких температурах представлена на рис. 4.30, где обозначены: 1 – днище печи, 2 – теплоизоляция, 3 – нагреватели, 4 – испытуемый образец, 5 – верхний шток (графит), 6 – металлический пуансон, 7 – крышка печи, 8 – грузы, 9 – индикатор, 10 – термопара.

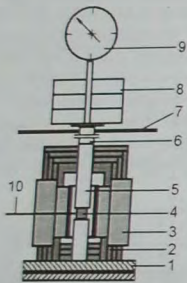


Рис. 4.30. Схема установки для определения деформации керамических материалов при высоких температурах под нагрузкой

Определение ТНД проводят не менее чем на трёх образцах от партии стержней. Размеры испытываемых образцов: диаметр (20±0,1) мм, высота (20±0,1) мм.

Непараллельность торцевых плоскостей основания в испытываемых керамических образцах не допускается более 0,05 мм. На рабочих поверхностях образцов не допускается наличие трещин, вмятин или сколов. При этом отношение высоты образца к высоте рабочего пространства печи установки должно быть не более 0,2.

Скорость нагрева образцов во время испытаний должна быть в пределах 6...12°C/мин. В процессе проведения исследований определяют следующие значения температуры: температуру начала деформации образцов при сжатии (0,5%) при нагрузке  $\sigma_{сж}=1,96$  МПа; температуру 1...4%-ной деформации при нагрузке  $\sigma_{сж}=1,96$  МПа; температуру начала деформации при нагрузке  $\sigma_{сж}>1,96$  МПа.

На основании полученных данных вычерчивают график в координатах температура – деформация, с помощью которого вычисляют температуру сжатия в пределах деформации от 0,5% до 4%. ТНД соответствует 0,5%-ной деформации образца. Полученная величина ТНД является предельной для материалов, работающих в условиях направленной кристаллизации отливок. В технологии, ориентированной на получение отливок из тугоплавких сплавов с равноосной макроструктурой, предельные рабочие температуры керамических материалов лежат между температурами, соответствующими ТНД и 4%-ному сжатию.

**Плотность, пористость, водопоглощение.** Степень податливости керамических стержней оценивают по величине их открытой пористости ( $P_0$ , %), а также связанному с ней, показателю водопоглощения ( $B$ , %). Кроме этого пористость обуславливает и кажущуюся плотность керамического материала, которая также фигурирует в числе характеристик керамического материала ( $\rho_k$ , г/см<sup>3</sup>).

Кажущаяся плотность ( $\rho_k$ ) – масса 1 см<sup>3</sup> материала, содержащего поры. Открытая пористость – объём пор, заполненных водой при кипячении образца, выраженный в % к общему объёму материала.

Водопоглощение – масса воды, заполнившая поры керамического материала при его кипячении и выраженная в % по отношению к массе сухого керамического материала. То есть:

$$\rho_k = \frac{m_c \cdot \rho_B}{m_1 - m_2}, \quad (4.5)$$

$$P_0 = \frac{100 \cdot (m_1 - m_c)}{m_1 - m_2}, \quad (4.6)$$

$$B = \frac{100 \cdot (m_1 - m_c)}{m_c}, \quad (4.7)$$

где  $m_c$  – масса сухого образца, г;  $m_1$  – масса образца, пропитанного водой и взвешенного на воздухе, г;  $m_2$  – масса образца, пропитанного водой и взвешенного в воде, г;  $\rho_B$  – плотность воды при 20°C ( $\rho_B \approx 1$  г/см<sup>3</sup>).

Для определения указанных характеристик используют методы насыщения и гидростатического взвешивания. Испытанию подвергают керамические образцы в виде брусков массой от 3 до 7 г. При этом образцы не должны иметь видимых трещин, царапин, впадин, выступов или сколов.

В исследованиях испытываемые сухие образцы предварительно взвешивают на аналитических весах и, уложив на подставку с отверстиями, помещают в сосуд таким образом, чтобы расстояние от дна сосуда до образцов было не менее 2 см. После этого в сосуд заливают дистиллированную воду с таким расчётом, чтобы её уровень был не менее чем на 2 см выше верхнего уровня образцов. Кипячение образцов ведут в течение 2...3 ч. По мере испарения в сосуд доливают воду до её первоначального уровня.

Насыщенные водой образцы взвешивают в воде, в которой их кипятили, после чего извлекают из воды, удаляют избыточную воду с поверхности образца, слегка протерев образцы влажной хлопчатобумажной тканью, и проводят повторное взвешивание на воздухе. Последним взвешиванием определяют массу насыщенного водой образца.

За истинный результат принимают среднее арифметическое значение результатов трёх параллельных испытаний, расхождение между которыми не должно превышать 3%.

В ряде случаев спечённые стержни контролируют на наличие в них воздушных раковин и внутренних трещин. Для выявления данных видов дефектов спечённые стержни подвергают рентген-контролю.

### 4.3. Стержни графитовые

Графитовые стержни (см. рис. 4.31) используют для получения отливок из титановых сплавов. Основным способом изготовления графитовых стержней, на сегодняшний день, является способ набивки графитовой смеси и её спекания в стержневом ящике.

Набивные графитовые стержни изготавливают из смесей, приготовленных на основе графитового порошка или смеси графитового порошка и мелкозернистого кокса. В качестве связующего вещества графитовых стержней используют фенолоформальдегидную или пульвербакелитовую смолу.



Например, для изготовления графитовых стержней используют следующие материалы: порошок коксовый М1, пульвербакелит СФП-011-Л (ОСТ 6-05-441-78), масса АТМ-У (ТУ 48-20142-88), кремнийорганическая жидкость КЭ 10-01 (ТУ 6-02-587-75), органические растворители, электрокорунд (ГОСТ 3647-80).



Рис. 4.31.  
Графитовый стержень

Процесс подготовки стержневой смеси для изготовления мелких стержней состоит в просеивании массы АТМ-У через сито с размером ячейки 0,63 мм, а процесс подготовки смеси для крупных стержней состоит в просеивании массы АТМ-У и пульвербакелита через сито с сеткой № 1,0. После просеивания готовят смесь, состоящую из: 54% коксового порошка, 20% пульвербакелита и 26% массы АТМ-У.

Перед изготовлением стержня проводят разборку металлического стержневого ящика, очистку его рабочих поверхностей, промывку их органическим растворителем (изопропиловым спиртом, бензином и т.п.) и протирку сухой чистой ветошью.

Подготовленный и собранный стержневой ящик помещают в печь и нагревают до температуры 180...200°C. После нагрева стержневой ящик извлекают из печи, раз-

бирают и проводят обдув его рабочих поверхностей сухим воздухом с последующим нанесением из пульверизатора слоя разделительной жидкости КЭ 10-01 толщиной 0,05...0,10 мм.

По окончании нанесения разделительной жидкости стержневой ящик, в собранном или разобранном виде, помещают на 10...20 мин в печь, предварительно нагретую до температуры 180...300°C. По окончании выдержки ящик извлекают из печи и повторяют процесс нанесения покрытия разделительной жидкости (3...4 приёма) до образования на рабочей поверхности стержневого ящика плёнки толщиной 0,1...0,3 мм.

**Изготовление стержней.** Подготовленный стержневой ящик предварительно нагревают до 150...250°C. Нагретый ящик извлекают из печи, устанавливают на столе в рабочее положение и вручную заполняют стержневой смесью, уплотняя её деревянной или алюминиевой трамбовкой. После набивки излишки смеси с поверхности ящика, удаляют с помощью линейки или скребка.

Стержневой ящик с уплотнённой смесью помещают в печь. Температура в печи, при загрузке в неё стержневого ящика, должна составлять 200...250°C (для стержней с толщиной стенки до 25 мм) или 250...450°C (для стержней с толщиной стенки более 25 мм).

При указанной температуре стержневой ящик выдерживают в течение 10...20 мин (до полного спекания стержневой смеси). По окончании спекания ящик вытаскивают из печи, разбирают и извлекают из него графитовый стержень.

После охлаждения стержень осматривают на предмет выявления поверхностных дефектов (трещин, шелушения, сколов и т.п.). В случае выявления дефектов стержень бракуют.

Годные стержни хранят на стеллажах, в коробах или противнях при комнатной температуре.

В процессе изготовления графитовых стержней на рабочую поверхность стержневого ящика наносят один слой разделительной жидкости через каждые 3...4 съёма стержней. При этом сушку очередного нанесённого слоя разделительной жидкости проводят в течение 10...15 мин.

#### 4.4. Стержни водорастворимые

В цехах литья по выплавляемым моделям водорастворимые стержни изготавливают, как правило, из сплавов, приготовленных на основе легкоплавкой соли. Водорастворимые стержни изготавливают как методом свободной заливки солевого расплава в стержневой ящик на воздухе, так и методом свободной заливки в вакууме, методом запрессовки из жидкого или пастообразного состояния, методом вакуумного всасывания расплава солевого сплава в установках типа УЗМ-2, УЗМ-3 и т.п.

К материалу водорастворимого стержня предъявляют следующие требования:

- высокая и стабильная размерная точность получаемых стержней;
- высокая чистота поверхности стержней;
- отсутствие склонности к образованию утяжин в стержнях;
- высокая жидкотекучесть расплава и заполняемость рабочих полостей формы;
- высокая прочность при комнатной температуре и теплоустойчивость;
- отсутствие гигроскопичности;
- относительно низкая температура плавления (в пределах от 50 до 180°C);
- высокая скорость затвердевания и охлаждения стержня в форме;
- химическая стойкость по отношению к модельному составу и осадке;
- высокая растворимость в воде при комнатной температуре;
- минимальная энергоёмкость и цикл изготовления;
- нетоксичность, пожаровзрывобезопасность;
- регенерируемость и простота утилизации водного раствора соли.

Как было отмечено выше, водорастворимые стержни, в основном, изготавливают из легкоплавких водорастворимых сплавов солей, например, приготовленных на основе карбамида, квасцов и др. (традиционные названия некоторых химических веществ см. в Приложении 7).

В настоящее время для изготовления водорастворимых стержней наиболее часто используют солевые сплавы, изготовленные на основе карбамида (технической мочевины). Стержни, полученные из таких сплавов, называют карбамидными, или мочевиными.

Карбамидные стержни используют для получения в моделях полостей, самых разных по конфигурации и размерам. В качестве примера на рис. 4.32,а представлен карбамидный стержень с внешним диаметром ~360 мм, а на рис. 4.32,б – карбамидный стержень с внешним диаметром ~220 мм.



Рис. 4.32. Стержни водорастворимые (карбамидные)



Водорастворимые солевые сплавы, изготовленные на основе карбамида, в жидком состоянии, обладают высокой жидкотекучестью и воспроизводимостью рельефа поверхности стержневого ящика, обеспечивают получение стержней без утяжин, с глянцевои поверхностью и стабильно высокой размерной точностью и точностью формы. Величина свободной линейной усадки стержней на основе карбамида составляет 0,15...0,5%, величина затруднённой линейной усадки — 0,10...0,35%.

Состав и свойства наиболее широко применяемых водорастворимых солевых сплавов на основе карбамида приведены в табл. 4.12.

Таблица 4.12  
Состав и свойства водорастворимых солевых сплавов на основе карбамида

Марка сплава	Состав, % (по массе)	Свойства					
		$\sigma_{и}$ , МПа	$\alpha$ , %	КТЛР, 1/°C	$t_{г}$ , °C	$t_{пл}$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
МПВС-2	94–96 карбамид, 1,5–3,0 поливиниловый спирт, 2–3 MgSO <sub>4</sub>	12–17	0,3–0,4	25 10 <sup>-6</sup>	68–72	110	1300
КБ-98-2	98 карбамид, 2 – кислота борная	14–18	0,3–0,5	25 10 <sup>-6</sup>	68–74	115	1305
МОН-10К	90 карбамид, 10 калиевая селитра, 1,5 кислота борная (сверх 100%)	15–19	0,15–0,4	26 10 <sup>-6</sup>	70–78	125	1320

Примечание.  $\sigma_{и}$  – предел прочности при статическом изгибе при 19±0,5°C;  $\alpha$  – свободная линейная усадка; КТЛР – коэффициент температурного линейного расширения;  $t_{г}$  – температура теплоустойчивости,  $t_{пл}$  – температура плавления;  $\rho$  – плотность, при 25°C. В некоторых случаях, для придания стержню определённого цвета, в стержневой состав, дополнительно вводят ~1% (сверх 100%) красителя (например, 0,01-метилового голубого).

Солевые водорастворимые сплавы в настоящее время централизованно не производят, поэтому их готовят непосредственно в литейном цехе. В процессе приготовления солевого сплава необходимо строго выдерживать состав сплава, указанный в табл. 4.12. В противном случае, отступление от указанной рецептуры сплава приводит к нарушению его технологических свойств. В частности, при повышенном содержании поливинилового спирта в сплаве МПВС-2 резко увеличивается склонность сплава к образованию трещин в стержнях.

Процесс приготовления сплава МПВС-2 состоит из следующих технологических операций. До начала приготовления сплава проводят сушку его исходных компонентов и приготовление соответствующих навесок из этих компонентов. Приготовленные навески компонентов смешивают, засыпают в плавильную ёмкость, выполненную из нержавеющей стали, расплавляют и, осуществляя периодическое перемешивание, повышают температуру расплава до 120...130°C. По достижении указанной температуры из плавильной ёмкости ковшем отбирают 1/6...1/5 часть расплава, в плавильную ёмкость вводят навеску поливинилового спирта, растворяют её и вливают ранее отобранную часть расплава.

Температуру расплава повышают до 120...130°C, не допуская перегрева выше 132°C (при температуре более 135°C происходит разложение карбамида), и выдерживают при данной температуре в течение 20 мин. По прошествии 20 мин сплав разливают по изложницам тонким слоем. В ряде случаев допускается использование возврата сплава в количестве до 30% от массы приготавливаемого сплава (для

солевых сплавов под возвратом следует понимать забракованные или поломанные стержни, литники).

Помимо сплава МПВС-2, для изготовления водорастворимых стержней довольно часто используют стержневой состав КБ-98-2, состоящий из 98% карбамида (технической мочевины) и 2% борной кислоты.

Для приготовления состава КБ-98-2 необходимо в электропечи при 100...120°C просушить карбамид и борную кислоту до полного удаления из них влаги. Влажность карбамида проверяют непосредственно после сушки, выборочно, но не реже 2-х раз в сутки. Влажность борной кислоты контролируют непосредственно после сушки и по мере необходимости.

Взвешенные количества исходных компонентов расплавляют в плавильной ёмкости, выполненной из нержавеющей стали. При этом вводят компоненты в плавильную ёмкость осуществляют порционно, по мере полного расплавления предыдущей порции, при температуре расплава 130...135°C. После полного расплавления навесок расплав перемешивают и разливают по изложницам.

При изготовлении водорастворимых стержней из чистого карбамида используют сплав, состоящий из (по массе) 50...70% первичного карбамида и 50...30% возврата собственного производства.

Приготовленный солевой сплав, при изготовлении стержней, необходимо использовать по мере его плавления, поскольку повторный переплав сплава и его длительное нахождение в жидком состоянии существенно ухудшают технологические свойства сплава и качество получаемых стержней. В частности, приготовленный сплав МПВС-2 в жидком состоянии рекомендуется держать не более 4 ч и не использовать сплав после его 2-го переплава.

Водорастворимые стержни изготавливают в металлических (стальных, алюминиевых) или металлопластиковых стержневых ящиках путём свободной заливки расплавленного сплава.

Перед использованием (сборкой) стержневой ящик с помощью деревянной счищальки, очищают от остатков материала предыдущего стержня, смазывают рабочие поверхности трансформаторным маслом или полиметилсилоксановой жидкостью ПМС-30 или ПМС-40 (ГОСТ 1303-77), или смазкой, состоящей из ПМС-30 и ПМС-100 в соотношении 1:1 (для металлических ящиков) или солидолом (для металлопластиковых ящиков).

Непосредственно перед заливкой температуру стержневого ящика доводят до 30...70°C путём его нагрева в печи или охлаждением на заливочном столе. При отсутствии печи нагрев металлического ящика проводят путём его заливки солевым сплавом. Металлопластиковые ящики следует нагревать только в печи.

Нагретый ящик собирают, после чего его заполняют жидким соляным сплавом с помощью ковша, изготовленного из листовой нержавеющей стали. В случае использования сплава, изготовленного на основе карбамида, температура расплава при заливке должна составлять 130...135°C.

В стержневой ящик большого объёма заливку расплава проводят порционно, с небольшими перерывами. После заливки каждой порции расплава необходимо временно изменить наклон ящика для предупреждения образования "заворотов" на поверхности затвердевшего стержня.

При толщине стержня более 10 мм рекомендуется, после образования на стенках стержневого ящика твёрдой корочки затвердевшего сплава толщиной более 3...15 мм, слить остаток жидкого сплава. Данный приём позволяет не только сократить расход сплава, но и повысить оборачиваемость стержневого ящика, а также существенно сократить длительность удаления стержня из модели (время растворения стержня в воде).



По окончании кристаллизации и охлаждения стержневого сплава до температуры  $21 \pm 3^\circ\text{C}$ , стержень из ящика извлекают.

Полученные стержни, при необходимости, зачищают с помощью ланцета или шлифовальной шкурки и визуально контролируют качество их поверхности. В некоторых случаях контроль стержней осуществляют путём обмера их основных геометрических размеров. Стержни с дефектными поверхностями или в случае размерного несоответствия бракуют и передают в переплав.

Для ремонта на поверхность дефекта стержня наносят слой расплавленного солевого сплава и, после его затвердевания излишки сплава с поверхности стержня удаляют. Защищенные стержни хранят в холодильнике при  $4 \dots 8^\circ\text{C}$ . Годные стержни должны быть использованы в течение 24 часов с момента их изготовления.

Стержни из состава КБ-98-2 хранят так же, как и стержни из состава МПВС-2. Допускается более длительное (до 3-х суток) хранение стержней в герметичных шкафах при  $18 \dots 22^\circ\text{C}$  в присутствии влагопоглощающего вещества, например, силикагеля. В том случае, если к размерной точности стержня не предъявляют высоких требований, допускается хранение стержней в течение 3-х суток при  $18 \dots 22^\circ\text{C}$  на открытом воздухе.

К недостаткам солевых водорастворимых сплавов, помимо гигроскопичности, относится не стабильность их технологических свойств, нередко приводящая к значительному браку стержней по недоливу, некачественной поверхности, газовым раковинам, трещинам и поломкам. В работе [2] отмечается, что введение в водорастворимые составы на основе карбамида борной кислоты, селитры, хлористого кальция и других неорганических солей позволяет повысить их технологические свойства. Однако наличие неорганических солей повышает гигроскопичность стержней на основе карбамида.

Присутствие в карбамиде селитры вызывает сильную коррозию осанстки и ободурования. Кроме того, различные сочетания неорганических добавок в карбамиде делают карбамидные стержни хрупкими, склонными к трещинообразованию. Выделение аммиака из расплава карбамида и, соответственно, накопление в нём биурета, вызванные термической нестабильностью карбамида, являются причиной появления в стержнях газовых раковин, спаев и недоливов.

С целью снижения гигроскопичности в сплавы на основе карбамида вводят  $0,6 \dots 5\%$  диметилглиоксина, с целью повышения трещиностойчивости сплавов в них вводят поливиниловый спирт или поливиниловый спирт с хлористым кальцием, или сульфат алюминия с салициловой кислотой. Для уменьшения газовыделения из расплава и уменьшения гигроскопичности стержней в сплав вводят галогенид аммония. Тем не менее в ряде случаев качество получаемых водорастворимых стержней на основе карбамида не всегда удовлетворяет предъявляемым к ним требованиям, а использование в составе карбамида различных технологических добавок, помимо этого, ещё и усложняет условия утилизации водных растворов карбамидных сплавов.

Помимо солевых водорастворимых сплавов, выполненных на основе карбамида, известен и ряд других сплавов, не нашедших распространения или ограниченно применяемых на промышленных предприятиях. К числу таких сплавов относится сплав карбамида с нитратом натрия (натриевой селитрой) в соотношении 80:20 соответственно, сплав нитрата калия и нитрата натрия (калиевой и натриевой селитры) в соотношении 55:45 соответственно, сплав сернокислого алюминия и алюминиево-аммониевых квасцов (сплав ВН 45-7), предложенный А.А. Жукowym и т.п.

Для приготовления сплава ВН 45-7 в равных частях берут  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{Al}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , которые сплавляют между собой в ёмкости из нержавеющей стали. Для изготовления стержней сплав, находящийся в пастообразном состоянии

при температуре  $80 \dots 85^\circ\text{C}$ , запрессовывают в пресс-форму. Стержни из сплава ВН 45-7 характеризуются высоким качеством поверхности, относительно невысокой гигроскопичностью, низкой скоростью растворения в воде и хорошей обрабатываемостью механическим способом. Свободная линейная усадка сплава –  $0,2 \dots 0,5\%$ , предел прочности при статическом изгибе, при  $19 \pm 1^\circ\text{C}$ , –  $8 \dots 11$  МПа, химические свойства – кислые, стержни склонны к короблению.

За рубежом широкое распространение нашли водорастворимые составы, выполненные на основе водорастворимых полимеров.

В работе [2] представлены результаты исследований свойств водорастворимых сплавов, изготовленных на основе водорастворимого полимера – полиэтиленгликоля (ПЭГ) с молекулярной массой более 1000. ПЭГ характеризуется высокой термостабильностью, низкой летучестью в диапазоне температур изготовления стержней, эластичностью, способностью течь под нагрузкой, хорошей растворимостью в воде, нетоксичностью, небольшим КТЛР.

Установлено [2], что добавка в ПЭГ поливинилового спирта снижает его усадку в  $1,5 \dots 2$  раза, гигроскопичность – в 1,5 раза, скорость растворения в воде – в 1,25 раза, повышает прочность на 10%, твёрдость – на 30%. Введение в ПЭГ борной кислоты или карбоната натрия снижает усадку ПЭГ в 2...3 раза, повышает твердость в 1,5...2 раза, прочность – в 1,3 раза, при этом скорость растворения и гигроскопичность понижаются незначительно.

В табл. 4.13 приведены сравнительные характеристики стержневых водорастворимых сплавов, выполненных на основе карбамида и ПЭГ [2].

Таблица 4.13  
Сравнительные характеристики стержневых водорастворимых сплавов

Параметр	Водорастворимые сплавы на основе	
	карбамида	ПЭГ
Температура, $^\circ\text{C}$ : затвердевания запрессовки (свободной заливки) в пресс-форму	115–120 (130–135)	45–47 41–50
Предел прочности при статическом изгибе, при $19 \pm 1^\circ\text{C}$ , МПа	12–15	4,5–7,0
Линейная усадка, %	0,1–0,6	0,3–0,9
Вязкость основы состава, МПа·с, при $132,7$ ( $50$ ) $^\circ\text{C}$	2,5	(177)
Плотность основы состава, $\text{кг}/\text{м}^3$ , при $20$ ( $132,7$ ) $^\circ\text{C}$	(1225)	1120

При изготовлении стержней из водорастворимых сплавов на основе ПЭГ используют как метод свободной заливки расплава в стержневой ящик, так и метод запрессовки в пресс-форму при температуре  $41 \dots 42^\circ\text{C}$  и давлении  $1,5 \dots 2,0$  МПа. В отдельных случаях в сплавы на основе ПЭГ вводят мелкодисперсный наполнитель.

Общим недостатком водорастворимых стержней является их гигроскопичность, сложность и дороговизна регенерации, которую, как правило, не проводят, что усложняет утилизацию водных растворов, получаемых после растворения стержней в воде.

#### 4.5. Подготовка стержней к установке в пресс-форму

Процесс подготовки керамических, графитовых или водорастворимых стержней к применению начинают с их визуального контроля на предмет выявления поломок, сколов, царапин, трещин или деформации. В дальнейшем, при необходимости, стержни обрабатывают, зачищая облой с помощью ланцета или специальных но-



жей. В некоторых случаях, непосредственно перед установкой в пресс-форму, водорастворимые стержни протирают сухой мягкой ветошью.

Керамические стержни, если на них ничего не нанесят, перед установкой в пресс-форму протирают мягкой сухой ветошью или обдувают сжатым воздухом.

В случае использования тонкостенного протяжённого керамического стержня, во избежание его разрушения, обеспечения прилипания тела модели к стержню и улучшения условий заполнения пресс-формы модельным составом, стержень в пресс-форму устанавливают подогретым до 40...60°C. В ряде случаев установку нагретого керамического стержня в пресс-форму осуществляют непосредственно после его пропитки расплавленным ремонтным модельным составом.

У керамических стержней, имеющих сквозные отверстия, каналы или глубокие полости, во избежание образования утяжин на поверхности модели в указанных местах, перед использованием вручную заполняют (см. рис. 4.33) эти углубления легкоплавким воскообразным (ремонтным) составом либо церезином нефтяным марок 60 или 75, либо техническим вазелином, петролатумом и т.п.

Конструкция каждой детали оригинальна и зачастую для получения качественной отливки требует индивидуального подхода в решении того или иного вопроса.

В качестве примера на рис. 4.34 представлены схемы поперечных сечений моделей пера турбинных лопаток с керамическим стержнем. Сопоставление изображений на представленных схемах свидетельствует о том, что со стороны "корыта" (вогнутой части пера лопатки) профиль реальной модели (см. рис. 4.34,б) существенно отличается от теоретического (см. рис. 4.34,а) на величину  $\Delta$ . По сути,  $\Delta$  — это величина воздушного зазора между стенкой модели со стороны "корыта" и керамическим стержнем, регистрируемая при обмере лопатки как отклонение профиля её пера.

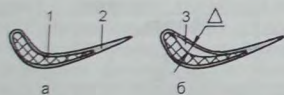


Рис. 4.34. Схемы разрезов моделей пера турбинных лопаток: 1 — керамический стержень; 2 — модель отливки; 3 — воздушный зазор

Причиной образования данного зазора является, с одной стороны, усадка модельного состава и отсутствие его сцепления с поверхностью керамического стержня. С другой стороны, на образование зазора между модельным составом и стержнем повлияла конфигурация стенки модели и стержня, а именно: "вогнутый" профиль стенки модели и керамического стержня со стороны "корыта".

Дело в том, что запрессованный в пресс-форму модельный состав, как правило, не имеет прочной связи с поверхностью керамического стержня и в процессе затвердевания и охлаждения обжимает его. При этом со стороны "спинки" (выпуклой части пера лопатки) слой модельного состава, опираясь на торцы керамического стержня, сжимает его (прижимается к поверхности стержня), а слой модельного состава со стороны "корыта", сжимаясь, отходит от поверхности керамического стержня, в конечном счёте, изменяя профиль модели турбинной лопатки. То есть конструкция профиля турбинной лопатки такова, что, независимо от типа используемого модельного состава, обладающего определённой усадкой при затвердевании, воздушный зазор между керамическим стержнем и телом модели со стороны "корыта" будет практически всегда присутствовать.

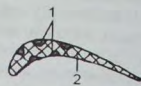


Рис. 4.33. Разрез керамического стержня с зашпательванными каналами: 1 — церезин (ремонтный состав), 2 — керамический стержень

Для предотвращения образования зазора необходимо либо использовать модельный состав с нулевой усадкой, либо обеспечить надёжный контакт керамического стержня с телом модели со стороны "корыта".

Для решения данной задачи автором разработан следующий способ (см. рис. 4.35). Перед установкой керамического стержня в пресс-форму на его поверхность, метром  $D_r = (0,2...0,8) \delta_k$  ( $\delta_k$  — толщина стенки модели со стороны "корыта"), с расстоянием между близлежащими гранулами 2...10 мм, что схематично представлено на рис. 4.35,а.

В качестве гранулированного органического вещества можно использовать, например, гранулы бисерного полистирола соответствующих фракций. Для закрепления гранул на поверхность керамического стержня, со стороны "корыта", кистью наносят слой органического клея (например, клея с торговой марки БФ-2).

После затвердевания клея гранулы бисерного полистирола окажутся приклеенными к поверхности стержня. Подготовленный таким образом керамический стержень можно устанавливать в пресс-форму и проводить запрессовку модельного состава.

В результате выполнения данной технологической операции приклеенные к поверхности керамического стержня гранулы, после охлаждения модели в пресс-форме, окажутся плотно зажатыми телом модели со стороны "корыта" (см. рис. 4.35,б). В свою очередь, механическое обжатие гранул модельным составом не позволит стенке модели, со стороны "корыта", отделиться от поверхности керамического стержня, что и обеспечит получение требуемого профиля пера модели турбинной лопатки.

На некоторых предприятиях, с целью предупреждения образования воздушного зазора в модели турбинной лопатки со стороны "корыта" и утяжин на поверхности пера турбинной лопатки за счёт увеличения интенсивности теплоотвода от охлаждающей стенки модели со стороны "корыта", небольшие керамические стержни перед использованием пропитывают дистиллированной водой. Для пропитки стержень погружают на 2...3 мин в кипящую воду, после чего стержень извлекают из воды и охлаждают до комнатной температуры. Перед использованием стержни протирают слегка влажной ветошью.

Керамические стержни сложной конфигурации, как правило, выполняют монолитными. Крупные стержни простой конфигурации в некоторых случаях выполняют полыми (см. рис. 4.36, где обозначены: 1 — тело стержня, 2 — полость в стержне). Польшть в "сыром" стержне выполняют в пресс-форме с помощью постоянного металлического стержня с целью ускорения процесса удаления стержня из полости отливки при выливке.

Перед упаковкой для обжига, полого "сырого" стержня в его внутреннюю полость засыпают подготовленный технический глинозём. Перед установкой стержня в пресс-форму для запрессовки модельного состава его внутреннюю полость также заполняют техническим глинозёмом и заглушают вход в канал стержня огнеупорной самотвердеющей смесью.

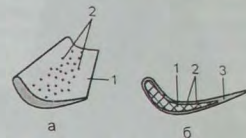


Рис. 4.35. Общий вид керамического стержня (а) и профиль "пера" модели качественной турбинной лопатки: 1 — керамический стержень; 2 — гранулы; 3 — модель отливки



Рис. 4.36. Полый керамический стержень



В литье по выплавляемым моделям и модели отливок, и модели ЛПС являются одноразовыми и изготавливаются из легкоплавких модельных составов. Модели некоторых отливок представлены на рис. 5.1.

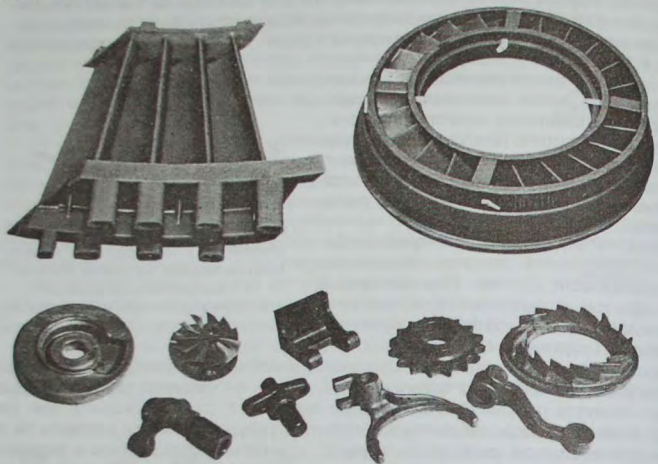


Рис. 5.1. Модели отливок

Модельный состав – это воскоподобный или металлический легкоплавкий сплав с температурой плавления (перехода в жидкое состояние) от 42°C до 165°C. В цехах литья по выплавляемым моделям наибольшее распространение получили воскоподобные модельные составы, представляющие собой многокомпонентные сплавы кристаллических и (или) аморфных веществ органического происхождения. Основой большинства модельных составов, используемых на отечественных предприятиях для изготовления моделей отливок общемашиностроительного назначения, является парафин. Для изготовления моделей отливок специального назначения используют модельные составы, изготовленные на основе природных и синтетических восков, смол и т.п. Для обеспечения определённых технологических свойств в некоторые модельные составы вводят твёрдый наполнитель (до 40%, по объёму) или непосредственно перед запрессовкой в пресс-форму в модельный состав замешивают воздух (до 35%, по объёму).

В зависимости от исходной структуры применяемых материалов, модельный состав в твёрдом состоянии может быть кристаллическим, аморфным либо иметь смешанную структуру. В зависимости от соотношения объёмных долей кристаллических и аморфных составляющих в структуре модельного состава, он приобретает свойства и характеристики, присущие, соответственно, или кристаллическим, или аморфным веществам (текучесть, хрупкость, прочность, матовость поверхности моделей и пр.).

В жидком состоянии модельный состав, без твёрдого наполнителя, является истинным раствором, который при понижении температуры кристаллизуется или застывает. При этом температурный интервал пастообразного состояния (жидкого) модельных составов изменяется в пределах от -1°C до 20°C и более. Учитывая невысокую температуру перехода модельного состава из жидкого в твёрдое состояние, по величине пастообразного состояния, все модельные составы можно разделить на узкоинтервальные, с температурным интервалом (Δt<sub>п</sub>) пастообразного состояния менее 5°C, среднеинтервальные (5°C ≤ Δt<sub>п</sub> ≤ 12°C) и широкоинтервальные (Δt<sub>п</sub> > 12°C). При этом, в отличие от относительно широкого температурного интервала в пресс-формы, как правило, изменяется от 1°C (для узкоинтервальных модельных составов) до 5...7°C (для широкоинтервальных модельных составов).

Как и все материалы, модельные составы имеют определённую маркировку. В настоящее время маркировка модельных составов не регламентируется каким-либо нормативно-техническим документом. Поэтому в марке модельного состава, могут быть указаны или компоненты, из которых состоит модельный состав и их количество (в процентах, по массе), или название модельного состава может быть аббревиатурой фирмы-производителя, или предприятия-разработчика данного модельного состава, или произвольным названием, или набором произвольных букв и цифр.

В том случае, если в марке модельного состава использованы буквенные обозначения материалов, из которых он состоит, то это означает, что в модельном составе присутствует: Б – воск буроугольный, Б<sub>н</sub> – битум нефтяной, Д<sub>бф</sub> – дибутилфталат, З<sub>в</sub> – воск защитный, К – канифоль, К<sub>о</sub> – кубовый остаток термического крекинга парафина, П – парафин, П<sub>м</sub> – петролатум, П<sub>зв</sub> – воск полиэтиленовый, П<sub>пр</sub> – полипропилен, П<sub>с</sub> – полистирол, П<sub>см</sub> – пушечная смазка или пластичная смазка ПВК, С – стеарин, С<sub>в</sub> – воск сибирский, С<sub>зв</sub> – сополимер этилена и винилацетата, С<sub>н</sub> – смола нефтеполимерная, Т – воск торфяной Т<sub>з</sub> – триэтанолламин, Ц – церезин, Ш – воск шеллачный, Э – этилцеллюлоза и т.п.

В этом случае числа в обозначении марки модельного состава, следующие за буквами, соответствуют массе компонентов, содержащихся в данном модельном составе и указанных в процентах, по массе. Например, обозначение модельного состава ПС 70-30 означает, что для изготовления данного модельного состава использовали, по массе, 70% парафина и 30% стеарина.

В других случаях, как это было отмечено выше, обозначения марок, не раскрывающих состав материала, обозначают аббревиатурой фирмы-производителя или предприятия-разработчика, например, ВИАМ – Всероссийский институт авиационных материалов (г. Москва), КС – частное научно-производственное предприятие "Карион-Сервис" (г. Днепропетровск) и т.п. Например, КС-3, КС-111-В, ВИАМ-102 и др. Цифры и буквы, следующие за аббревиатурой предприятия-разработчика, обозначают номер марки, который присваивается предприятием-разработчиком модельного состава.

### 5.1. Требования к выплавляемым модельным составам

В цехах литья по выплавляемым моделям для изготовления моделей отливок и ЛПС используют модельные составы, изначально находящиеся в жидком, пастообразном или твёрдом состоянии. При этом, для изготовления моделей из пастообразного или жидкого модельного состава, его нагревают до соответствующей температуры.



В настоящее время из числа известных способов изготовления выплавляемых моделей наибольшее распространение получил способ запрессовки в пресс-форму модельного состава, находящегося в пастообразном состоянии. Использование, какого-либо воскоподобного легкоплавкого вещества в "чистом" виде для изготовления моделей данным способом не представляется возможным. Это связано с тем, что каждое отдельно взятое вещество (например, парафин, стеарин, буроугольный воск, битум нефтяной и т.п.) не обладает требуемым уровнем свойств и технологичности, необходимым для получения качественных моделей в тех или иных промышленных условиях. Например, парафин недостаточно прочен и склонен к образованию утяжин в моделях, черезин нефтяной имеет высокую линейную усадку, низкую твердость и прочность, склонен к прилипанию к поверхностям пресс-формы и т.д.

В связи с этим каждый модельный состав представляет собой сплав двух и более компонентов или смесь нерастворимых друг в друге веществ. При этом, как правило, один из компонентов сплава является растворителем, а остальные компоненты – технологическими добавками (легирующими компонентами и/или наполнителем). Каждый из легирующих компонентов модельного состава придает ему определённый уровень свойств и характеристик. Например, черезин синтетический или воск полиэтиленовый придают парафину твердость, прочность, теплоустойчивость, расширяют температурный интервал затвердевания, повышают текучесть сплава в пастообразном состоянии, стеарин, введенный в парафин, понижает склонность к образованию утяжин в моделях и т.д.

В подавляющем числе случаев выплавляемая модель отливки является практически точной копией будущей детали. При этом нередко условия формирования модели отливки не менее сложны, чем условия формирования самой отливки.

По сути, выплавляемая модель, получаемая из жидкого или пастообразного модельного состава – это отливка, полученная в результате заливки или запрессовки и охлаждения модельного состава в неподатливую пресс-форму, с использованием примитивной литниковой системы. Учитывая относительно сложные условия формирования моделей и высокие требования к их качеству, при разработке модельные составы оценивают по следующему комплексу свойств [235].

#### **Физические свойства и параметры модельных составов.**

1. **Предел прочности при статическом изгибе ( $\sigma_{\text{и}}$ ) при 18...20°C** – определяет способность моделей и модельных блоков противостоять разрушению под действием механических нагрузок в процессе их хранения и технологических манипуляций с ними. Чем больше величина  $\sigma_{\text{и}}$ , тем прочнее модельный блок, тем меньше потерь моделей и модельных блоков в процессе изготовления КО. Прочность наиболее распространённых модельных составов, как правило, находится в пределах от 3 до 8 МПа.

2. **Твёрдость (пенетрация) при 20°C** – косвенно характеризует степень защищённости поверхности моделей от механических повреждений (царапин, вмятин) и склонность моделей к деформации (короблению).

Твёрдость модельного состава, или пенетрация (лат. penetratio – проникать) – мера (глубина) проникновения иглы определённых размеров в образец модельного состава, при определённой нагрузке на иглу, за определённое время, при 20°C. Чем меньше пенетрация, тем твёрже модельный состав (испытуемое вещество).

Большинство наиболее широко используемых модельных составов, изготовленных на основе материалов органического происхождения, имеют твёрдость в пределах от 3 до 12 мм<sup>3</sup>.

3. **Теплоустойчивость (теплостойкость)** – способность изделия из модельного состава, при повышенных температурах, сохранять свою форму или максимальная температура, при которой модели и модельные блоки сохраняют точность формы. То есть теплоустойчивость определяет максимальную температуру, ниже которой модельный состав обеспечивает сохранение формы изделия из него.

Требуемую минимальную величину теплоустойчивости модельного состава назначают в зависимости от максимальной (сезонной) величины температуры воздуха в отделениях изготовления моделей и нанесения огнеупорного покрытия, условий сушки огнеупорного покрытия на модельных блоках, требований к качеству выпускаемого литья и т.п.

Теплоустойчивость модельных составов оценивают по изменению жёсткости, показателем которой служит так называемая деформационная теплоустойчивость – температура, при которой начинает развиваться недопустимо большая деформация образца, находящегося под нагрузкой собственной массы и нагреваемого по определённому режиму.

4. **Пластичность** – показатель величины максимальной деформации образца модельного состава до его разрушения. Косвенно характеризует трещиностойчивость модельного состава. Трещиностойчивость модельного состава возрастает с повышением его пластичности (вязкости) и снижением величины свободной линейной усадки.

5. **Модуль упругости (E) при 18...20°C** – параметр, характеризующий жёсткость изделий из модельного состава или упругость моделей и модельных блоков (упругость – это свойство макроскопических тел сопротивляться изменению их объёма или формы под воздействием механических напряжений. При снятии приложенного напряжения объём и форма упругодеформированного тела восстанавливаются).

Показатель учитывают при выборе модельных составов, пригодных для изготовления крупногабаритных тонкостенных моделей, например, моделей протяжённых неохлаждаемых турбинных лопаток. При всех прочих равных условиях, использование модельных составов с высоким модулем упругости обеспечивает наиболее высокую точность формы отливок.

6. **Свободная линейная усадка ( $\alpha_{\text{л}}$ )** – показатель относительного изменения линейных размеров модели, затвердевшей и охлаждённой до 18...20°C, в условиях свободной усадки, по сравнению с аналогичными размерами рабочей полости пресс-формы. Как правило, модельные составы имеют величину  $\alpha_{\text{л}}=0,3...1,3\%$ .

Показатель используют для прогнозирования размерной точности моделей и расчёта размеров рабочих полостей пресс-форм. Кроме размерной точности, данный показатель заметно влияет на склонность модельного состава к образованию трещин в моделях и на их коробление. Чем ниже величина  $\alpha_{\text{л}}$ , тем выше трещиностойчивость модельного состава и меньше степень коробления моделей.

Следует отметить, что величина свободной линейной усадки модельного состава зависит не только от природы материала модельного состава, но и условий получения модели, её формы и размеров, условий подготовки модельного состава к запрессовке в пресс-форму, однородности модельного состава по объёму и т.п. Величину  $\alpha_{\text{л}}$  уменьшают путём насыщения модельного состава воздухом непосредственно перед его запрессовкой в пресс-форму либо путём ввода в модельный состав твёрдого и (или) жидкого наполнителя.

7. **Затруднённая линейная усадка ( $\alpha_{\text{л3}}$ )** – показатель относительного изменения линейных размеров модели, затвердевшей и охлаждённой до 18...20°C в условиях затруднённой усадки, по сравнению с аналогичными размерами рабочей полости пресс-формы. Как правило, модельные составы имеют величину  $\alpha_{\text{л3}}=(0,3...0,6)\alpha_{\text{л}}$ . Величина показателя  $\alpha_{\text{л3}}$ , при всех прочих равных условиях, зависит от начальной



температуры пресс-формы, теплофизических параметров модельного состава (пресс-формы, длительности выдержки модели в пресс-форме и пр. Показатель используется для прогнозирования размерной точности моделей и расчёта размеров рабочих полостей пресс-форм.

8. *Коэффициент термического линейного расширения ( $K_m$ )* – величина абсолютного изменения линейных размеров модели (образца модельного состава) при изменении её (его) температуры на один градус. С уменьшением коэффициента  $K_m$  повышается размерная точность отливок, точность формы и массы отливок. Кроме того, значение коэффициента  $K_m$  предопределяет величину силового воздействия модели на КО в процессе её выплавления из КО. Чем меньше величина  $K_m$ , тем меньше напряжения возникают в КО при выплавлении из неё модельного состава и тем меньше вероятность разрушения КО. Учитывается при выборе способа удаления модельного состава из КО и определении количества слоёв КО.

Если модельный состав имеет большее значение  $K_m$  и не содержит замешанный в него воздух, то выплавление модели из КО следует проводить в паровом автоклаве (бойлерклаве). Модельные составы с малым значением  $K_m$  можно выплавлять любым из известных способов (в воде, в модельном составе, в горячем воздухе и т.д.). Как правило, у выплавляемых модельных составов, изготовленных на основе материалов органического происхождения,  $K_m = (80...250) \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ . Чем больше величина данного показателя, тем выше склонность модельного состава к короблению моделей.

9. *Температурный интервал пастообразного состояния ( $\Delta t_p$ )* – интервал температур, в котором модельный состав находится в пастообразном состоянии. Один из показателей технологичности модельного состава, определяющий интервал температур запрессовки модельного состава в пресс-форму. Учитывается при выборе способа подготовки и запрессовки модельного состава в пресс-формы и возможности использования в модельном составе наполнителей.

Для изготовления моделей "узкоинтервальные" модельные составы ( $\Delta t_p < 5^\circ\text{C}$ ) используют преимущественно в пастообразном состоянии и замешиванием в них воздуха от 13 до 35% (по объёму), "широкоинтервальные" модельные составы ( $\Delta t_p > 12^\circ\text{C}$ ) используют в пастообразном состоянии как в чистом виде, так и с замешиванием в них твёрдого наполнителя от 15 до 45% (по массе). Модельные составы со средним температурным интервалом пастообразного состояния ( $5 \leq \Delta t_p \leq 12$ ) используют как без наполнителя, так и с наполнителем (газообразным, жидким или твёрдым).

10. *Температура каплепадения* – минимальная температура, выше которой наблюдается наиболее полное удаление модельного состава из КО. Учитывается при выборе способа выплавления модельного состава из КО. Для снижения безвозвратных потерь модельного состава при его выплавлении из КО необходимо, чтобы температура каплепадения модельного состава была значительно ниже температуры среды, в которой происходит выплавление модельного состава.

11. *Температура размягчения* – температура перехода модельного состава из твёрдого в пастообразное или вязкопластичное состояние. Если провести аналогию с металлическими сплавами, то понятие температуры размягчения модельного состава будет соответствовать температуре солидус металлических сплавов. Для большинства модельных составов температура размягчения составляет около  $54...65^\circ\text{C}$ .

Наиболее низкой температурой размягчения ( $t_p = 42^\circ\text{C}$ ), из числа наиболее широко применяемых модельных составов, обладает модельный состав, состоящий из парафина и стеарина в равных, по массе, количествах. У модельных составов типа

КПСЦ, изготовленных на основе сосновой канифоли, температура размягчения находится в пределах от  $130$  до  $140^\circ\text{C}$ .

Показатель учитывают при назначении нижнего температурного предела запрессовки модельного состава в пресс-форму.

12. *Температура плавления* – температура перехода модельного состава из твёрдого состояния в жидкое состояние. Температура плавления, как характеристика материала, присуща только чистым кристаллическим веществам (парафин, церезин, буроугольный воск, ртуть и др.) и эвтектическим сплавам (в данном случае легкоплавким металлическим сплавам на основе висмута). Используется при назначении нижнего температурного предела запрессовки модельного состава в пресс-форму.

13. *Кинематическая вязкость ( $\nu$ ), или число градусов Энглера ( $^\circ\text{E}$ ) при  $100^\circ\text{C}$*  – один из параметров, определяющий технологичность модельного состава в отношении полноты его удаления из КО при выплавлении. Учитывается при прогнозировании величины технологических потерь модельного состава. Влияет на качество и длительность регенерации модельного состава (очистки от посторонних частиц). Чем ниже вязкость жидкого модельного состава, тем, при всех прочих равных условиях, меньше технологических потерь модельного состава, тем эффективнее и быстрее проходит его очистка от случайных включений в процессе регенерации. Наибольшую вязкостью обладают модельные составы, содержащие твёрдые наполнители, нерастворимые в жидкой восковой основе модельного состава.

Вязкость (viscosity) – это внутреннее трение или сопротивление, которое оказывают частицы жидкости их взаимному перемещению под действием внешней силы. Как правило, вязкость модельных составов определяют при температуре  $100^\circ\text{C}$  и представляют в сантистоксах ( $1 \text{ cSt} = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} = 1 \text{ мм}^2/\text{с}, 100 \text{ cSt} = 1 \text{ Ст}$ ).

Большинство модельных составов, используемых для изготовления моделей отливок общемашиностроительного назначения, при  $100^\circ\text{C}$  имеют величину кинематической вязкости от 5 до 30 сСт. Кинематическая вязкость модельных составов, используемых для получения моделей отливок типа турбинных лопаток, турбин, роторов, сопловых аппаратов и т.п., находится в пределах от 12 до 120 сСт.

С увеличением кинематической вязкости до  $40...70$  сСт возникает большие сложности с регенерацией модельного состава по неметаллическим включениям. При величине кинематической вязкости более  $\sim 70$  сСт модельный состав практически, не регенерируем без применения специальных способов. Кроме того, модельные составы с высокой кинематической вязкостью ( $\nu > 70$  сСт) склонны к насыщению водой при их выплавлении из КО в среде перегретого пара (в бойлерклаве).

Число градусов Энглера, одна из форм выражения вязкости жидкостей, которое, для рассматриваемого случая, представляет собой отношение времени (в секундах) истечения 200 мл испытываемого вещества (модельного состава), нагретого до  $100 \pm 1^\circ\text{C}$  ко времени (в секундах) истечения 200 мл воды при  $20^\circ\text{C}$ . Соотношение между кинематической вязкостью ( $\nu$ ) и числом градусов Энглера ( $^\circ\text{E}$ ) выражается уравнением (сСт):

$$\nu = 7,31 \cdot \frac{^\circ\text{E}}{^\circ\text{E}} \quad (5.1)$$

14. *Индекс вязкости (viscosity index)* – эмпирический безразмерный показатель, в рассматриваемом случае используемый для построения зависимости кинематической вязкости жидкого модельного состава от температуры.



Высокий индекс вязкости указывает на существенное незачистное понижение кинематической вязкости модельного состава с повышением температуры его расплава. Такой модельный состав, при изначально высокой вязкости (при 100°C), будет плохо удаляться из КО в процессе выплавки из них модельного состава, а также регенерироваться даже при повышении температуры до 140...180°C.

Данный параметр используют для прогнозирования полноты удаления модельного состава из КО при его выплавке и для назначения температурного режима регенерации модельного состава.

15. Плотность в твёрдом (при 20°C) и жидком (при 100°C) состояниях – используется для расчётов массы моделей и модельных блоков, расчёта технологических потерь модельного состава, для выбора способа, оборудования и среды выплавки модельного состава из КО и т.д.

В частности, некоторые расплавленные модельные составы, обладающие низкой кинематической вязкостью и плотностью, превышающей плотность воды, при выплавке в бойлерклаве склонны к всплыванию и интенсивному разбрызгиванию в его рабочем пространстве. Для предотвращения данного явления рекомендуется понизить давление пара в бойлерклаве при выплавке модельного состава из КО с 8 бар до 4 бар. Плотность большинства модельных составов в твёрдом состоянии находится в пределах от 0,85 до 1,05 г/см<sup>3</sup>.

16. Предел прочности клеевого соединения при 18...20°C – характеризует прочность клеевого соединения (при статическом изгибе) частей модели, собираемой из отдельных элементов методом склеивания. Чем выше величина данного показателя, тем прочнее клеевое соединение, тем прочнее модель и модельный блок, тем выше точность получаемой отливки, тем меньше на отливке дефектов засорного характера.

17. Термостойкость – термостойкость характеризует верхний предел рабочих температур модельного состава, определяемый его устойчивостью к деформации в окислительной среде. Термостойкость определяют по изменению массы образца в процессе его нагрева с заданной скоростью.

## Химические свойства

1. Кислотное число, число омыления – косвенные характеристики химического состава модельного состава. Предопределяют склонность модельного состава к химическому взаимодействию с другими веществами в процессе всего технологического цикла его использования и регенерации. В частности, данные характеристики используют при оценке возможного химического взаимодействия модельного состава с жидкими компонентами огнеупорной суспензии.

Кислотное число – количество миллиграммов гидроксида калия (KOH), необходимое для нейтрализации всех кислых компонентов, содержащихся в 1 г исследуемого модельного состава.

Щелочное число (число омыления) показывает общую щелочность модельного состава. Щелочное число выражают через количество прореагировавшей гидроокиси калия (KOH) в мг с 1 г испытуемого модельного состава. Модельный состав должен обладать определенной щелочностью для сохранения способности к нейтрализации кислот, образующихся при его окислении.

Для характеристики модельного состава наиболее часто используют показатель кислотного числа, который изменяется от 0,001 для модельных составов, изготовленных на основе синтетических восков и смол, до 2...165 мг KOH/г для модельных составов, содержащих вещества природного происхождения (буроугольный воск, торфяной воск, горный воск, канифоль, стеарин и т.д.).

С повышением кислотного числа химическая активность модельного состава возрастает, что влечёт за собой изменение его технологических свойств и чистоты. Характерно, что при повторном использовании практически все модельные составы с кислотным числом, отличным от нуля, становятся более технологичными.

2. Взаимодействие со связующим раствором – показатель химической активности модельного состава по отношению к компонентам огнеупорной суспензии. Увеличение химической активности модельного состава по отношению к связующему раствору огнеупорного покрытия ухудшает качество поверхности КО и отливки, но в то же время повышает адгезионные свойства модельного состава по отношению к огнеупорной суспензии.

3. Омыление модельного состава – показатель, определяющий максимальное значение величины водородного показателя (рН) воды в ванне выплавки модельного состава из КО, при котором происходит его интенсивное омыление и, как следствие, насыщение жидкого модельного состава водой.

При омылении содержание воды в выплавленном модельном составе может достигать 30% по массе, что делает данный модельный состав непригодным для повторного использования без регенерации (выпаривания воды).

4. Зольность (массовая доля золы) – относительная масса твёрдого остатка (несгораемой части модельного состава) после сжигания навески модельного состава. Составляющими зольности являются сажистый остаток ( $m_c$ ) и остаток неорганического происхождения ( $m_n$ ).

В первичных модельных составах (в состоянии поставки) зольность, как правило, находится в пределах от 0,02 до 0,2%. Причём в первичном модельном составе  $m_c \gg m_n$ . При повторном использовании модельного состава (после выплавки из КО) его зольность повышается за счёт увеличения доли случайных неметаллических частиц (отломившиеся частицы КО, песчинки, цеховой сор и пыль, и т.д.). При этом в возврате модельного состава  $m_c \ll m_n$ .

С точки зрения влияния на качество отливок, зольность модельного состава сказывается на качестве отливок следующим образом.

При  $m_c \gg 0$  в отливках из сплавов с температурой заливки, превышающей температуру прокаливания КО более чем на 100...150°C, могут образовываться газовые раковины, спай или недоливы, если КО прокалена при температуре, меньшей чем 500...600°C. Во всех остальных случаях влияние зольности на качество отливок, при  $m_c \gg 0$ , практически не сказывается.

В случае, если  $m_n \gg 0$ , зольность может явиться одной из причин брака отливок, качество поверхности которых контролируют методами капиллярной дефектоскопии.

5. Коксуемость – определяет газотворную способность КО. Чем выше величина коксуемости, тем выше вероятность образования в отливках газовых раковин, сплавов и недоливок.

Применительно к модельным составам, коксование – процесс образования твёрдого кокса в результате нагрева модельного состава без доступа кислорода. Соответственно, коксуемость – это склонность модельного состава при нагревании образовывать коксовый остаток при термическом разложении модельного состава в отсутствие воздуха.

## Технологические свойства

1. Длительность затвердевания и охлаждения модели в пресс-форме – определяет цикл оборачиваемости пресс-форм и производительность оборудования для изготовления моделей. Оказывает прямое влияние на размерную и геометрическую



точность моделей, образование в моделях утяжин, трещин, поверхностных дефектов и т.д. Чем выше скорость затвердевания и охлаждения модельного состава в пресс-форме, тем выше размерная точность моделей, ниже склонность к образованию утяжин и короблению моделей. С другой стороны, высокая скорость затвердевания модельного состава может быть причиной понижения качества поверхности моделей, увеличения величины свободной линейной усадки и способствовать повышению брака моделей по трещинам.

2. Длительность стабилизации размеров модели при охлаждении на воздухе – определяет длительность минимальной выдержки (охлаждения) моделей на воздухе до сборки модельного блока. Данный параметр всецело зависит от теплофизических свойств модельного состава в модели, в частности от её теплопроводности и теплоёмкости. Чем выше теплопроводность и ниже теплоёмкость материала модели, тем быстрее происходит стабилизация её размеров, тем менее склонна модель к короблению.

При насыщении модельного состава воздухом, теплопроводность и теплоёмкость модели понижаются. В случае использования в модельном составе твёрдых или жидких наполнителей, теплопроводность и теплоёмкость модели изменяются соответствующим образом в зависимости от величин аналогичных показателей материала наполнителя.

3. Склонность к образованию утяжин в моделях – свойство, определяющее склонность модельного состава к образованию утяжин в моделях в процессе их затвердевания и охлаждения. С уменьшением склонности модельного состава к образованию утяжин в моделях повышается точность моделей и производительность их изготовления (за счёт сокращения времени на ремонт моделей). Склонность модельного состава к образованию утяжин в моделях тем ниже, чем выше коэффициент сжимаемости модельного состава в жидком состоянии и выше доля компонентов (составляющих модельного состава) с аморфной структурой.

4. Содержание воздуха в моделях – показатель воздушнонаполненности модельного состава в момент его запрессовки в пресс-форму. Насыщение модельного состава пузырьками воздуха происходит в период его перемешивания (гомогенизации) в пастообразном состоянии и может носить специальный или случайный характер.

Наличие относительно большого содержания воздуха в модельном составе предопределяет существенное изменение ряда его физических и технологических свойств. Например, с повышением содержания воздуха в модельном составе понижается прочность модели, кажущаяся плотность модельного состава, усадка, склонность к образованию в моделях трещин, утяжин и увеличивается длительность затвердевания и охлаждения моделей, в связи с чем снижается оборачиваемость пресс-форм и производительность оборудования, уменьшается силовое воздействие модели на КО при выплавке из неё модельного состава и т.д. При этом возникает необходимость ограничения давления запрессовки модельного состава в пресс-форму.

В случае принудительного замешивания воздуха в пастообразный модельный состав, его количество составляет 13...22% от объёма модельного состава. В некоторых случаях содержание воздуха в модельном составе повышают до 25...30% и более.

При изготовлении монолитных моделей из модельных составов, не допускающих наличия воздуха, его присутствие, даже в малых количествах, может явиться причиной отбраковки моделей или их ремонта. Дело в том, что такие модельные составы для получения моделей отливок запрессовывают в пресс-форму под давлением 0,3...0,5 МПа. Поэтому наличие воздушных пузырьков в моделях приводит к

“вздутию” поверхности модели после их извлечения из пресс-формы (рельеф поверхности модели становится похожим на поверхность кожиры апельсина).

5. Содержание в модельном составе твёрдого наполнителя – относительное количество твёрдого мелкодисперсного материала, как правило, органического происхождения в модельном составе. Твёрдый наполнитель вводят в модельный состав с целью уменьшения и стабилизации линейной усадки модельного состава, снижения степени коробления моделей, повышения прочности и теплоустойчивости модельного состава, повышения скорости затвердевания и охлаждения модели. Как правило, содержание твёрдого наполнителя в модельном составе колеблется от 15 до 32% (по объёму). Степень изменения вышеперечисленных параметров модельного состава зависит от количества используемого наполнителя, адгезионных свойств наполнителя по отношению к легкоплавкой основе модельного состава, формы и размеров частиц наполнителя и др. Наличие твёрдого наполнителя в модельном составе существенно понижает его текучесть и незначительно понижает склонность модельного состава к образованию утяжин в моделях.

6. Коробление – склонность модельного состава к необратимой деформации модели в процессе её охлаждения на воздухе или нанесения и сушки огнеупорного покрытия на ней. Величина коробления моделей и, соответственно, отливок тем меньше, чем больше теплопроводность и прочность модельного состава и меньше коэффициент термического линейного расширения модельного состава. Последний, из перечисленных параметров оказывает решающее влияние на величину коробления моделей.

7. Текучесть – способность модельного состава в пастообразном состоянии заполнять рабочее пространство пресс-формы. Определяет склонность модельного состава к образованию поверхностных дефектов модели (спаев, незаливов и т.п.). Показатель учитывают при выборе модельного состава, используемого для изготовления тонкостенных протяжённых моделей либо моделей с тонкими керамическими стержнями. Чем ниже текучесть модельного состава, тем выше вероятность неформления тела модели и (или) разрушения керамического стержня в момент заполнения пресс-формы модельным составом.

При всех прочих равных условиях, наибольшей текучестью обладают модельные составы, не содержащие твёрдых наполнителей, либо содержащие такой твёрдый наполнитель, который растворяется в жидкой восковой основе модельного состава.

8. Воспроизводимость рельефа рабочих поверхностей пресс-формы – способность модельного состава в пастообразном состоянии чётко воспроизводить рельеф рабочих поверхностей пресс-форм.

9. Чистота поверхности – является одной из характеристик понятия воспроизводимости. Определяет степень соответствия чистоты (шероховатости) поверхности модели и соответствующей рабочей поверхности пресс-формы. Предопределяет чистоту поверхности отливки и образование на поверхности отливки микротрещин засорного характера, выявляемых методами капиллярной дефектоскопии.

10. Прилипаемость – способность модельного состава прилипать к рабочим поверхностям пресс-формы. Определяет трудность извлечения модели из пресс-формы. Отрицательно влияет на точность формы модели в связи с деформацией или разрушением модели, вызванной приложенным усилием для отрыва модели от рабочей поверхности пресс-формы. Для предупреждения прилипаемости следует подобрать соответствующую разделительную смазку для обработки рабочих поверхностей пресс-формы.

11. Трещиностойчивость (I) при затвердевании и охлаждении – свойство модельного состава сохранять целостность моделей (модели отливки и моделей эле-



ментов литниково-питающей системы) в процессе их затвердевания и охлаждения в пресс-форме и вне её.

12. Трещиностойчивость (П) при "перехождении" – свойство модельного состава сохранять целостность моделей (модели отливки и литниково-питающей системы) при резком кратковременном понижении температуры, возникающем в результате интенсивного испарения растворителя (спирит, ацетона, воды и т.п.) с поверхности модельного блока при сушке первого или второго слоя огнеупорного покрытия.

13. Обработываемость (механическая) – качественный показатель, характеризующий поведение модельного состава в процессе обработки модели резанием. Зачастую модель, извлечённую из пресс-формы, зачищают вручную с помощью ножа или скальпеля, удаляя облой по линии разёма пресс-формы, залилов со знаковых частей керамического, графитового или водорастворимого стержня и т.п. При этом хрупкий модельный состав, в процессе зачистки облоя, скалывается или выкрашивается вместе с частями тела модели, приводя тем самым модель в негодность. Другим крайним случаем является чрезмерно вязкий модельный состав, который не даёт хрупких сколов, но тянется и прилипает к поверхности модели и режущего инструмента, затрудняя процесс обработки модели.

14. Содержание воды в модельном составе – используется для оценки содержания воды в модельном составе после его выплавления из КО в воде или перегретом водяном паре (допустимое содержание воды в модельном составе – не более 0,5%, по массе). Кроме того, данный показатель используется для определения содержания воды в водонаполненных модельных составах, использующих воду в качестве наполнителя в количестве от 2...7% до 25...35% (по массе). В последнем случае воду используют для моделей, не подвергающихся пайке в процессе сборки модельного блока.

15. Смачиваемость огнеупорной суспензией – зависит от адгезионных свойств модельного состава и огнеупорной суспензии. Влияет на качество поверхности отливки (чистоту поверхности, образование дефекта "сыпь" и т.п.). Чем ниже смачиваемость поверхности модели огнеупорной суспензией, тем выше вероятность появления на поверхности отливки дефекта "сыпь", тем ниже качество и чистота литой поверхности отливки, тем ниже размерная точность отливки.

При всех прочих равных условиях, смачиваемость поверхности модели огнеупорной суспензией возрастает при: снижении шероховатости поверхности модели, омылении поверхности модели в водном растворе щёлочи, введении в состав огнеупорной суспензии поверхностно-активного вещества, повышении вязкости суспензии (увеличении содержания в суспензии пылевидного материала) и т.п.

16. Расслоение модельного состава в жидком состоянии – показатель стабильности свойств модельного состава и возможности его вторичного использования. В технологическом процессе использования модельного состава его расслоение, как правило, происходит в процессе затвердевания модельного состава, после его выплавления из КО, либо в процессе регенерации модельного состава методом отстаивания.

Модельные составы, расслаивающиеся в жидком состоянии, использовать не рекомендуется.

17. Пределно-допустимая температура нагрева модельного состава в жидком состоянии (температура "пережога") – температура расплава модельного состава, выше которой впоследствии модельный состав в твёрдом состоянии теряет свои физико-химические и (или) технологические свойства. То есть в результате "пережога" модельный состав, например, становится хрупким, менее прочным, теряет трещиностойчивость, понижается чистота поверхности моделей, изменяется

цвет, в жидком модельном составе плавится, коагулирует и выпадает в осадок твёрдый наполнитель и т.п.

### Органолептические показатели

1. Цвет – показатель, который в равной степени можно отнести как к технологическим, физическим, так и потребительским свойствам модельных составов. В модельных составах цвет играет второстепенную роль. Тем не менее желательно, чтобы модельный состав имел светлые, пастельные тона. Это позволяет визуально контролировать качество поверхности моделей без значительного напряжения зрения. Кроме того, в случае использования в одном цехе нескольких марок модельных составов их различный цвет предупредит случайное смешивание разных марок модельных составов друг с другом.

В процессе подготовки модельного состава к запresseвке или в случае использования возврата модельного состава в производстве изменение цвета модельного состава даёт косвенную информацию о его состоянии и возможности его последующего использования в производстве.

Если для запresseвки в пресс-формы используют воздушнонаполненный модельный состав, то по цветовому оттенку изготавливаемых моделей, а также по однородности цвета их поверхности, судят о качестве подготовки к запresseвке модельного состава и т.п.

2. Запах. Практически любой модельный состав имеет свой характерный запах. Желательно, чтобы запах модельного состава не носил едкий, "острый" характер и соответствовал 0-му или 1-му баллу.

### Санитарная, экологическая, пожаро- и взрывобезопасность

1. Газотворная способность (газотворность) – объём газообразных продуктов, образовавшихся в результате сжигания навески модельного состава массой 1 г при 1000°C. Используют для расчёта количества выбросов газообразных продуктов горения в атмосферу.

2. Токсичность твёрдого и жидкого модельного состава, паров, продуктов его деструкции и полного сгорания – используется для оценки химического, токсикологического и аллергического воздействия на организм человека, оценки предельно допустимых концентраций веществ в воздухе, определения типа и параметров системы вентиляции на модельном участке и участка прокаливания форм, очистных сооружений, назначения индивидуальных средств защиты и мер по оказанию медицинской помощи.

3. Нижний температурный и концентрационный пределы возгорания модельного состава определяют комплекс мероприятий по обеспечению пожаро- и взрывобезопасности при производстве, транспортировке, хранении, использовании модельного состава и утилизации его отходов.

### 5.2. Материалы для модельных составов

Для изготовления воскоподобных модельных составов используют искусственные и природные материалы органического и неорганического происхождения, находящиеся при комнатной температуре в твёрдом или жидком состоянии. По происхождению компоненты воскоподобных модельных составов можно объединить в следующие группы:



- материалы нефтяного происхождения – парафин, церезин, петролатум ("сырой церезин"), технический вазелин, кубовый остаток термического крекинга парафина, битум и др.;
- воски минеральные (ископаемые) – буроголиный, торфяной, озокерит (горный воск);
- воски синтетические – высокоплавкий церезин, полиэтиленовый, полипропиленовый и др.;
- воски натуральные (животного и растительного происхождения) – пчелиный, шеллак карнаубский, рисовый, кандильский, подсолнечника и др.;
- смолы натуральные – живица, канифоль (сосновая, талловая);
- смолы синтетические – фенолоформальдегидные, мочевиноформальдегидные, эпоксидные, нефтяные полимерные и др.;
- материалы полимерные – полиэтилен, полипропилен, сополимер этилена и винилацетата, полистирол и др.;
- материалы животного происхождения – стеарин;
- прочие материалы – дибутилфталат, триэтанолламин, глицерин, касторовое масло, техническая мочевила (карбамид), графитовый порошок, уротропин, поливинилый спирт, поливинилацетат целлюлозы и т.д.

**Парафин.** Парафин является самой распространённой составляющей модельных составов, используемых для получения моделей отливок общемашиностроительного назначения. Парафин представляет собой смесь твёрдых насыщенных углеводородов предельного (метанового) ряда и, в зависимости от степени очистки, имеет плотность от 880 до 915 кг/м<sup>3</sup>. Помимо алкановых углеводородов, преимущественно нормального строения с числом атомов углерода от 9 до 40, в парафине присутствуют также изопарафиновые, циклопарафиновые (нафтеновые) и нафтеноароматические углеводороды. Очищенный парафин представляет собой кристаллическую массу белого цвета с температурой плавления от 42 до 75°C.

Парафин получают, в основном, из масляных дистиллятов парафинистых нефтей при обезмасливании гача (смеси парафина с маслом). Свойства нефтяных твёрдых парафинов в соответствии с ГОСТ 23683-89 представлены в табл. 5.1.

Свойства нефтяных твёрдых парафинов

Таблица 5.1

Показатель	Норма для марок									
	P1	P2	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	T-1	T-2	T-3	C
Внешний вид	Кристаллическая масса белого цвета						Кристаллическая масса белого цвета, допускаются оттенки серого или желтого			
Температура плавления, °C (не ниже)	54	52	47	45	43	40	52-58	52-56	50-56	45-52
Массовая доля масла, %, не более	0,45	0,8	0,45				1,80	2,30	3,00	2,20
Пенетрация при 25°C и массе груза 100 г, мм, не более	-	-	16	14	13	12	-	-	-	-

Парафин наиболее доступный и относительно недорогой компонент модельных составов. Свободная линейная усадка парафина составляет 0,4...0,5%. К недостаткам парафина следует отнести его невысокую теплопроводность, теплоустойчивость, прочность и склонность к образованию значительных утяжин в моделях. Из числа примесей парафина, на свойства модельных составов наиболее значительное влияние оказывают масла, присутствующие в парафине. Для изготовления вы-

скокачественных модельных составов используют парафин с минимальным содержанием в нём масел, с наибольшей твёрдостью и температурой плавления.

**Стеарин.** Сырьём для получения стеарина являются животные либод растительные масла. Для производства модельных составов применяют дистиллированный стеарин первого или второго сорта с температурой плавления не менее 52°C. Зольность стеарина не превышает 0,02%, свободная линейная усадка – до 2%, кислотное число – более 160 мг КОН/г.

Стеарин представляет собой светло-жёлтую массу, жирную на ощупь, и является смесью твёрдых жирных кислот (стеариновой и пальмитиновой) плотностью около 890...920 кг/м<sup>3</sup>. Кроме стеариновой и пальмитиновой кислоты, стеарин также содержит некоторое количество олеиновой кислоты.

Стеариновая кислота –  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$  – это одноосновная насыщенная карбоновая кислота алифатического ряда, одна из наиболее распространённых в природе высших жирных кислот. Стеариновая кислота нерастворима в воде, растворима в эфире и представляет собой бесцветную кристаллическую массу с температурой плавления 69,9°C.

Пальмитиновая кислота –  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$  – это одноосновная насыщенная карбоновая кислота, которая представляет собой бесцветную кристаллическую массу с температурой плавления 63,1°C. Пальмитиновая кислота нерастворима в воде, умеренно растворима в спирте, бензоле, ацетоне.

В зависимости от долевого содержания в стеарине вышеперечисленных кислот, изменяются его свойства и, соответственно, свойства модельного состава, содержащего стеарин.

**Церезин.** Церезин является микрокристаллической смесью твёрдых углеводородов предельного (метанового) ряда, плотностью 910...940 кг/м<sup>3</sup>. В зависимости от способа получения, церезины делят на нефтяные и синтетические. По внешнему виду нефтяной церезин представляет собой однородную пластилиноподобную массу от жёлтого до коричневого цвета.

Церезин получают в результате очистки озокерита, а также из парафинистых отложений, образующихся в трубах при добыче и перекачке нефти ("парафиновые пробки"), или в результате специальной химико-термической обработки петролатума.

Синтетический высокоплавкий церезин – это твёрдый материал от белого до светло-жёлтого цвета. Синтетический церезин получают при каталитическом синтезе жидкого топлива, состоящего, в основном, из нормальных алканов, низкомолекулярного полиэтилена и др.

Церезины, производимые из нефти, должны соответствовать ГОСТ 2488-79, синтетические высокоплавкие церезины – ГОСТ 7658-74. Марки церезинов устанавливают в зависимости от температуры их каплепадения. То есть число в марке церезина соответствует минимальному значению температуры каплепадения (в °C) для данной марки.

Для производства модельных составов используют нефтяные церезины марок 65, 70, 75 и 80. Более предпочтительными для изготовления модельных составов являются синтетические высокоплавкие церезины, которые имеют более высокую температуру каплепадения и, соответственно, выпускаются под марками 90, 93 и 100. Физико-химические показатели некоторых марок церезина приведены в табл. 5.2.

Церезин химически устойчив к гидролизованным растворам этилсиликата, жидкому стеклу и кремнезёлу. Линейная усадка церезина – до 3,5%. В модельных составах, изготавливаемых на основе парафина, синтетический церезин повышает прочность твёрдость, теплостойкость, обеспечивает высокие и стабильные техноло-



гические свойства модельному составу. Церезин нефтяного происхождения придает модельным составам, изготавливаемым на основе парафина, пластичность, понижает прочность, твердость и теплоустойчивость. Чем выше температура каплепадения используемого церезина нефтяного происхождения, тем выше степень снижения вышеречисленных параметров модельного состава.

Физико-химические показатели церезина.

Таблица 52

Показатели	Норма для марки					
	65	70	75	80	80Н	100
Внешний вид	Однородная масса от темно- до светло-желтого цвета, без заметных механических примесей					
Температура каплепадения, °С	65-70	70-75	75-80	80-85	80-85	100
Пенетрация при 25°С, мм <sup>1</sup> , не более	30	25	18	16	12	6
Массовая доля механических примесей, %, не более	0,02				0,1	0,1
Содержание воды, %, не более	Отсутствие				0,3	Отсутствие
Массовая доля золы, %, не более	0,02				0,03	0,025
Кислотное число, мг КОН/г, не более	0,06				0,1	0,2
Температура плавления, °С					70	72

Примечание. Свойства церезина марки 80Н регламентированы ТУ 38.401218-94.

**Петролатум.** Петролатум ("сырой церезин") является продуктом переработки нефти, при комнатной температуре – мягкое и вязкое вещество от светло-коричневого до темно-коричневого цвета, плотностью около 900 кг/м<sup>3</sup>. Петролатум получают при депарафинизации нефтяных масел серной кислотой или при их селективной очистке.

Физико-химические показатели петролатума приведены в табл. 53

Таблица 53

Физико-химические показатели петролатума (ТУ У 00152307.027-96)

Показатели	Норма
Цвет	От светло-коричневого до коричневого
Температура каплепадения, °С	65
Кислотное число, мг КОН/г, не более	0,05
Массовая доля механических примесей, %, не более	0,07
Массовая доля серы, %, не более	0,6
Массовая доля воды, %, не более	Следы
Пенетрация при 25°С, мм <sup>1</sup> , не более	70
Температура вспышки в открытом тигле, °С, не ниже	250
Плотность при 20°С, кг/м <sup>3</sup>	840-845

В модельных составах петролатум используют, в основном, как пластифицирующий компонент. На некоторых предприятиях на основе петролатума готовят ремонтные модельные составы, используемые как для ремонта моделей, так и для выполнения галтелей при сборке модельных блоков методом пайки.

**Полиэтилен**  $[-CH_2-CH_2-]_n$  – твердый, прозрачный, термопластичный полимер. Полиэтилен получают в результате полимеризации этилена при высоком давлении (полиэтилен низкой плотности), низким или среднем давлении (полиэтилен высокой плотности). Структура и свойства полиэтилена определяются способом его получения. Среднемассовая молекулярная масса полиэтилена наиболее распространенных марок – 30...800 тыс., степень кристалличности и плотность при 20°С составляют, 50...90% и 918...968 кг/м<sup>3</sup> соответственно. С увеличением плотности возрастает

тают твердость, модуль упругости при изгибе, предел текучести и химическая стойкость полиэтилена.

Полиэтилен устойчив к действию щелочей любых концентраций, органических кислот, концентрированных соляной и плавиковой кислот; разрушается азотной кислотой, хлором и фтором, при температуре выше 80°С растворяется в алифатических и ароматических углеводородах и их галогенопроизводных, физиологически безвреден.

Полиэтилен характеризуется высокой теплоустойчивостью, температурой плавления, прочностью и влагуостойчивостью, обладает практически абсолютной стойкостью к связующим материалам, используемым в литье по выплавляемым моделям. Существенными недостатками полиэтилена являются его высокая вязкость в жидком состоянии, большая линейная усадка (~4%) и склонность к образованию утяжин в моделях.

**Полистирол** – линейный полимер стирола,  $[-CH_2-CH(C_6H_5)-]_n$  – очень твердое, прочное, прозрачное, стекловидное вещество. Молекулярная масса полистирола составляет 30...500 тыс., плотность – 1060 кг/м<sup>3</sup> при 20°С, температура стеклования 93°С. Полистирол характеризуется высокой влагуостойкостью, химически стоек, растворяется в ароматических и хлорированных алифатических углеводородах, физиологически безвреден.

В зависимости от способа изготовления, полистирол классифицируют на блочный и эмульсионный. Для изготовления моделей используют блочный полистирол, как обладающий меньшей зольностью по сравнению с эмульсионным. При температуре более 60...80°С полистирол деструктурирует с выделением стирола.

**Полипропилен** – термопластичный полимер пропилена,  $[-CH_2-CH(CH_3)-]_n$ , – твердое, бесцветное кристаллическое вещество изотактической структуры. Молекулярная масса – 300...700 тыс., максимальная степень кристалличности – 73...75%, плотность – 920...930 кг/м<sup>3</sup> при 20°С,  $t_{пл} = 174...178^{\circ}C$ .

Полипропилен не растворяется в органических растворителях (растворим в ароматических углеводородах только при температуре более 120°С), устойчив к воздействию кипящей воды и щелочей, но темнеет и разрушается под действием HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, хромовой смеси.

**Битумы технические** – вещества черного цвета, обладающие твердой или вязкой консистенцией. Битумы получают, в основном, из тяжелых нефтяных остатков, богатых асфальтово-смолистыми веществами, путём глубокой вакуумной перегонки тяжелых нефтяных остатков (мазатов, гудронов и др.) при 300...350°С (остаточные битумы), окислением кислородом воздуха тяжелых остатков от перегонки нефти (гудронов и др.) при 260...280°С (окисленные битумы), смешением окисленных битумов с неокисленными нефтепродуктами (компаундированные битумы).

Основные компоненты нефтяных битумов – асфальтены, смолы и нефтяные масла. Технические показатели битумов приведены в табл. 54.

Таблица 54

Некоторые свойства твердых и полутвердых битумов

Битумы	Дуктильность, мм (при 25°С)	Пенетрация, мм <sup>1</sup> (при 25°С)	Температура размягчения, °С	Температура вспышки, °С
Твердые	1,0-3,0	0,5-4,0	60-90	230
Полутвердые	40-60	4,1-20,0	25-50	180-200

Примечание. Дуктильность – способность битума при растяжении давать нить определенной длины. Определяется по толщине нити, которая образуется в результате растяжения стандартного образца битума до разрыва.



**Смолы природные (натуральные)** – твердые вещества различной прозрачности и окраски (от бесцветных до темно-коричневых), содержащиеся в смолоносных растениях. Природные смолы извлекают из жидкости (живицы и т.п.), которая самопроизвольно или в результате ранения (подсочки) растения выделяется на его поверхность. Природные смолы плавятся при нагревании, нерастворимы в воде, растворяются или набухают в органических растворителях. Основные составляющие природных смол – смоляные кислоты, одно- или многоатомные смоляные спирты (резинолы), сложные эфиры смоляных кислот и смоляных спиртов или одноатомных фенолов (таннолов). Помимо этого, в смолах могут присутствовать эфирные масла и вода.

Наиболее часто применяемые в модельных составах смолы – канифоль, шпалак, значительно реже – живица.

**Живица (терпентин)** – это смолистое вещество, выделяющееся при ранении хвойных деревьев (сосны, кедра, ели, лиственницы) на их поверхности. Застывшее на поверхности ствола дерева смолистое вещество (живица) предохраняет его, «заживляет» рану (отсюда название).

Живица является основным сырьём для получения канифоли и скипидара.

**Канифоль** – это хрупкое стекловидное вещество, имеющее цвет от светложелтого до темно-красного или темно-коричневого. В состав канифоли входят смоляные кислоты (80...95%), имеющие общую формулу  $C_{19}H_{29}COOH$ , и нейтральные неомыляемые вещества (5...12%). Получают канифоль в виде остатка после отгонки из смолистых веществ летучей части.

Плотность канифоли 1070...1085 кг/м<sup>3</sup>, температура размягчения 52...70°C. Канифоль хорошо растворяется в эфире, спирте, нерастворима в воде. В зависимости от вида сырья и способа получения, канифоль классифицируют на канифоль живичную (получают в результате отгонки скипидара и из очищенной живицы), канифоль экстракционную (получают в результате экстракции из измельченной древесины просмоленных сосновых пней органическими растворителями, преимущественно бензином) и канифоль талловую (получают в результате фракционной разгонки сырого таллового масла – продукта переработки мыла сульфатного).

Для производства модельных составов используют преимущественно канифоль сосновую, производимую в соответствии с ГОСТ 19113-84, или канифоль талловую, производимую в соответствии с ГОСТ 14201-83.

Физико-химические показатели сосновой и талловой канифоли приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Физико-химические показатели сосновой и талловой канифоли

Показатель	Норма для канифоли			
	сосновой		талловой	
	высший сорт	первый сорт	высший сорт	первый сорт
Внешний вид	Масса прозрачная, стекловидная или с наличием пузырьков воздуха			
Массовая доля воды, %, не более	0,2			
Массовая доля золы, %, не более	0,03	0,04	0,03	0,04
Массовая доля механических примесей, %, не более	0,03	0,04	0,03	0,03
Температура размягчения, °С, не ниже	69	68	60	60
Кислотное число, мг КОН/г, не менее	169	168	165	160
Склонность к кристаллизации	Отсутствие медового осадка			
Массовая доля неомыляемых веществ, %, не более	6,0	6,5	5	6

**Воски** – жироподобные вещества с температурой плавления от 40 до 90°C. По происхождению, воски классифицируют на искусственные, животные, растительные и ископаемые (минеральные). К числу наиболее известных искусственных восков относятся воски полиэтиленовые. Из числа животных восков наибольшее распространение, для изготовления модельных составов, получил пчелиный воск. К растительным воскам, используемым в модельных составах, относится воск карнаубский. К ископаемым воскам относится церезин, получаемый очисткой озокерита, а также буроугольный воск (монтан-воск), выделяемый из бурого угля, и торфяной воск, выделяемый из торфа.

**Воск полиэтиленовый.** Полиэтиленовые воски являются низкомолекулярными полиэтиленами с молекулярной массой от 5 до 1000. Получают полиэтиленовые воски в результате термической деструкции полиэтилена высокого давления. Полиэтиленовые воски представляют собой белую массу с температурой плавления 65...110°C и плотностью 830...950 кг/м<sup>3</sup>. В отличие от полиэтилена высокого давления, полиэтиленовые воски легко растворяются в жидком парафине, церезине, восках и смолах. Наиболее применяемыми в модельных составах являются полиэтиленовые воски марок ПВ-200, ПВ-300, ПВ-500 и ПВ-1000, физико-химические свойства которых приведены в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Физико-химические свойства полиэтиленовых восков

Показатель	Норма для марок не окисленного воска			
	ПВ-200	ПВ-300	ПВ-500	ПВ-1000
Внешний вид	Куски, чешуйки, брикеты			
Вязкость расплава при 140°C, Па·с·10 <sup>-3</sup>	180-299	300-449	450-999	1000-2000
Температура каплепадения, °С, не менее	103	106	107	109
Массовая доля золы, %, не более	0,01			
Пенетрация при 25°C, мм <sup>-1</sup>	0,3	0,03	0,03	0,02
Плотность при 20°C, кг/м <sup>3</sup>	880	920	940	960
Кислотное число, мг КОН/г	0,08	0,09	-	-
Теплоустойчивость, °С	85	88	-	-
Свободная линейная усадка, %	2,6	2,5	-	-
Предел прочности при изгибе при 18-20°C, МПа	7,8	7,9	-	-

В модельном составе полиэтиленовый воск существенно расширяет температурный интервал его пастообразного состояния, повышает прочность и теплоустойчивость. Существенным недостатком полиэтиленовых восков является их высокая линейная усадка. Кроме того, полиэтиленовый воск, как и полиэтилен, значительно повышает склонность модельных составов к образованию утяжин в моделях.

**Воск буроугольный.** Буроугольный воск (монтан-воск, горный воск, битум) является смесью сложных углеводородов, состоящей из парафина, воскообразных, смоляных и асфальтеновых веществ, и относится к группе битумов. Буроугольный воск представляет собой очень твердое хрупкое кристаллическое вещество коричневого цвета. Получают буроугольный воск из битуминозного бурого угля путем растворения в органическом растворителе (бензине, ацетоне) восковой составляющей бурого угля с последующим удалением растворителя из воска. Плотность буроугольного воска находится в пределах от 950 до 1010 кг/м<sup>3</sup>, и, как и его свойства, во многом зависит от условий получения воска и его состава. Некоторые физико-химические свойства буроугольного воска приведены в табл. 5.7.

Использование буроугольного воска в модельном составе повышает его прочность, теплоустойчивость, твердость, теплопроводность, обеспечивает глянец на



поверхности моделей, снижает склонность модельного состава к образованию утяжин в моделях. Буроугольный воск практически не взаимодействует с гидролизующим раствором этилсиликата.

Физико-химические свойства буроугольного воска

Таблица 5.7

Показатель	Норма
Температура плавления, °С	79–82
Температура плавления, °С	71–73
Массовая доля нерастворимых веществ в бензине, %, не более	0,35
Массовая доля золы, %	0,03–0,30
Кислотное число, мг КОН/г	25–36
Сплаиваемость с парафином при отношении 1:3	Полная

Свободная линейная усадка буроугольного воска составляет 1,5...2,0%. К числу существенных недостатков буроугольного воска относится нестабильность его свойств, от партии к партии воска, обусловленная нестабильностью его состава.

**Воск торфяной.** Торфяной воск получают в результате переработки торфяного битума. Различают "сырой" торфяной воск (торфяной битум), представляющий собой лекообразную массу от тёмно-коричневого до чёрного цвета с температурой плавления 50...75°С; обесмоленный торфяной воск и рафинированный торфяной воск. Битумы из торфа извлекают путём его растворения в органическом растворителе (бензине, дихлорэтане, смеси спирта с бензолом и др.).

В состав "сырого" торфяного воска входит (по массе): воск (40...45%), парафин (40...45%), смола (20...10%).

Обесмоленный воск получают путём обработки "сырого" воска холодным бензином, а рафинированный воск – обработкой обесмоленного торфяного воска серной кислотой и бихроматом калия.

Торфяной воск обладает высокой твёрдостью и в модельных составах способствует повышению прочности и теплоустойчивости моделей, глянцевоности поверхности моделей, технологичности модельного состава. Свободная линейная усадка торфяного воска составляет 1,3...2,1%. К числу недостатков торфяного воска, как и воска буроугольного, относится нестабильность его свойств, от партии к партии, обусловленная нестабильностью его состава.

**Триэтаноламин технический** – (2,2',2''-нитрилотриэтанол) – это густая жидкость с температурой кристаллизации около 17°С. Хорошо растворим в воде. Физико-химические свойства триэтанолamina технического (марка "Б" по ТУ 6-02-916-79) приведены в табл. 5.8.

Таблица 5.8

Физико-химические свойства триэтанолamina технического марки Б

Показатель	Норма
Внешний вид	Жидкость от жёлтого до коричневого цвета
Плотность при 20°С, кг/м³	1095–1135
Фракционный состав при остаточном давлении (2,7±0,2) кПа: при температуре до 170°С, не более	15
при температуре от 170 до 225°С, не менее	80
остаток после разгонки, не более	6

Используется в модельных составах, изготовленных на основе минеральных восков, для расширения температурного интервала пастообразного состояния и повышения пластичности модельных составов.

**Дибутилфталат** – ди-н-бутиловый эфир о-фталевои кислоты,  $C_8H_{16}(COOC_4H_9)_2$  – бесцветная маслянистая жидкость со слабым фруктовым запахом. Плотность 1047...1050 кг/м³ при 25°С, растворимость в воде – 0,1% при 20°С, число омыления – 405 мг КОН/г, температура вспышки – 160...165°С, зольность – менее 0,02%. В модельных составах, изготовленных на основе смол, используется в качестве пластификатора.

**Наполнители модельных составов.** Наполнитель для большинства модельных составов, запрессовываемых в пресс-формы в пастообразном состоянии, является их неотъемлемой частью. Использование наполнителя в модельном составе преследует следующие цели: предупреждение образования утяжин в моделях, понижение и стабилизация линейной усадки моделей, понижение степени коробления модельного состава из КО и т.п.

Используемые для модельных составов наполнители при комнатной температуре могут быть в газообразном (воздух), жидком (вода) или твёрдом состоянии. Газообразный наполнитель (воздух) используют в качестве наполнителя для получения моделей отливок общемашиностроительного назначения при относительно низком давлении запрессовки пастообразного модельного состава в пресс-форму (до 0,15...0,16 МПа) или для условий сушки огнеупорного покрытия на модельном блоке, не предполагающих использование вакуума.

Твёрдый наполнитель, в отличие от наполнителя газообразного, используют в модельных составах, которые запрессовывают в пресс-формы при давлениях до 0,5 МПа и более, с целью получения моделей отливок с высокой чистой поверхности, при получении отливок с очень тонкими стенками, при использовании вакуума в процессе сушки огнеупорного покрытия на модельных блоках.

Жидкий наполнитель (воду) в модельных составах используют в тех же случаях, что и твёрдый наполнитель, но с условием, что сборку моделей в блоки не проводят методом пайки.

В состоянии поставки модельные составы не содержат ни газообразного, ни жидкого наполнителя.

**Газообразный наполнитель.** В основном, воздухом насыщают узкоинтервальные модельные составы, изготовленные на основе парафина или церезина. Как было отмечено выше, насыщение модельного состава воздухом перед запрессовкой в пресс-форму преследует цель предупреждения образования в моделях утяжин, снижения линейной усадки моделей, снижения силового воздействия модели на КО в процессе выплавки из неё модельного состава.

При замешивании воздуха в модельный состав понижается не только линейная усадка моделей, но и, вместе с этим, понижается прочность и теплоустойчивость моделей, увеличивается длительность затвердевания и охлаждения моделей, снижается чистота поверхности моделей.

В качестве примера на рис. 5.2 пред-

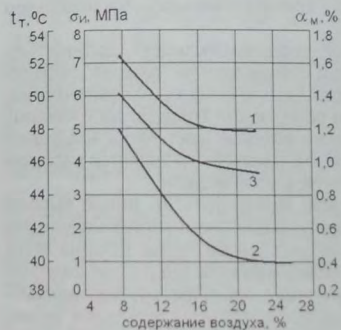


Рис. 5.2. Зависимость некоторых параметров модельного состава МВС-15 от содержания в нём (в моделях) воздуха (% по объёму) [265]



ставлены зависимости величины свободной линейной усадки  $\alpha_M$  (кривая 1), теплоустойчивости  $t_T$  (кривая 2) и предела прочности  $\sigma_{II}$  при статическом изгибе при 18...20°C (кривая 3) модельного состава МВС-15 от содержания в нём воздуха.

Характер изменения параметров, зависимость которых от величины содержания воздуха в моделях представлена на рис. 5.2, практически аналогичен для всех модельных составов.

Позтому величину свободной линейной усадки модели ( $\alpha_M$ ), изготовленной из воздушнонаполненного модельного состава (при содержании воздуха в модельном составе от 10 до 30%, по объёму), в первом приближении автор рекомендует рассчитывать по эмпирической формуле (%):

$$\alpha_M = A_{\alpha} \cdot \exp(-0.01 \cdot C_{\alpha} \cdot U_B) + B_{\alpha}, \quad (5.2)$$

где  $U_B$  – объём воздуха, замешанного в модельный состав, %;  $A_{\alpha}$ ,  $C_{\alpha}$ ,  $B_{\alpha}$  – коэффициенты (для состава МВС-15:  $A_{\alpha}=1$ ,  $C_{\alpha}=15$ ,  $B_{\alpha}=1,2$ ).

Предел прочности модельного состава, содержащего воздух (от 10 до 30%, по объёму), при статическом изгибе (при 18...20°C) можно рассчитать по эмпирической формуле (МПа):

$$\sigma_{II} = A_{\sigma} \cdot \exp(-0.01 \cdot C_{\sigma} \cdot U_B) + B_{\sigma}, \quad (5.3)$$

где  $A_{\sigma}$ ,  $C_{\sigma}$ ,  $B_{\sigma}$  – коэффициенты (для состава МВС-15:  $A_{\sigma}=6$ ,  $C_{\sigma}=10$ ,  $B_{\sigma}=3$ ).

Теплоустойчивость модельного состава, содержащего воздух (от 10 до 30%, по объёму), можно рассчитать по эмпирической формуле (°C):

$$t_T = A_T \cdot \exp(-0.01 \cdot C_T \cdot U_B) + B_T, \quad (5.4)$$

где  $A_T$ ,  $C_T$ ,  $B_T$  – коэффициенты (для состава МВС-15:  $A_T=18$ ,  $C_T=8,6$ ,  $B_T=38$ ).

Замешивание воздуха в пастообразный модельный состав проводят в период его подготовки к запрессовке в пресс-форму. Замешиваемый воздух должен быть равномерно распределён по объёму модельного состава и находиться в модельном составе в виде мелкодисперсных пузырьков.

Давление запрессовки модельных составов, содержащих воздух, должно быть строго ограничено 0,15...0,16 МПа. В противном случае модель "раздуёт" либо поверхность модели, спустя некоторое время после извлечения её из пресс-формы, "вспучивается" – приобретает бугристость (вид поверхности альпийской кожеры). Причиной "раздутия" модели является чрезмерно высокое давление в воздушных пузырьках тела модели, причиной "вспучивания" её поверхности является расширение воздуха в воздушных пузырьках в поверхностном слое модели.

Причиной "вспучивания" поверхности модели может быть не только высокое давление запрессовки модельного состава в пресс-форму, но и нагрев модели, например, солнечными лучами или любым другим источником тепла. Помимо этого, "вспучивание" поверхности модели может произойти в результате плохой подготовки пастообразного модельного состава к запрессовке в пресс-форму, выражающееся в наличии в подготовленном модельном составе воздушных пузырьков весьма крупных размеров (диаметром более 1 мм).

Хорошо подготовленный модельный состав в изломе затвердевшей модели имеет однородный цвет без видимых вооружённым глазом воздушных пузырьков (за исключением центральных частей термических узлов модели). Первым признаком плохой подготовки воздушнонаполненного модельного состава является неоднородность цвета поверхности модели. Если подготовленный модельный состав од-

нороден по содержанию в нём воздуха, то поверхность модели, изготовленной из такого модельного состава, однотонна. В противном случае на поверхности модели появляются участки в виде полос и краплений, имеющих различные оттенки её основного цвета. С увеличением содержания воздуха в модельном составе, модели приобретают более светлые оттенки, например, от коричневого до жёлтого и т.п.

Из вышеизложенного следует, что подготовка воздушнонаполненного модельного состава к запрессовке вручную нежелательна, а в ряде случаев – недопустима. Поэтому для успешного использования воздушнонаполненных модельных составов следует использовать механические мешалки, обеспечивающие высокую однородность воздушнонаполненного пастообразного модельного состава, а также однородность и мелкодисперсность воздушных пузырьков в нём.

Достижение высокой чистоты поверхности модели, изготовленной из воздушнонаполненного модельного состава, не представляется возможным в связи с вынужденным ограничением давления запрессовки по вышеописанным причинам. Поэтому для обеспечения высокой чистоты поверхности моделей и заполнениями пресс-форм используют модельные составы, с широким интервалом температур запрессовки, не содержащие воздуха в пастообразном состоянии. Использование таких модельных составов делает возможным проводить их запрессовку в пресс-формы под давлением до 0,5 МПа и более.

**Жидкий наполнитель.** В отечественной практике производства моделей в промышленных условиях жидкий наполнитель в модельных составах не используют. Тем не менее использование жидкого наполнителя (дистиллированной воды) возможно в модельных составах со средним и широким температурным интервалом затвердевания.

Использование воды в качестве наполнителя позволяет, прежде всего, решить следующие вопросы: повысить качество поверхности моделей за счёт увеличения давления запрессовки модельного состава в пресс-формы, предупредить образование в моделях утяжин, повысить текучесть модельного состава, сократить длительность охлаждения модели в пресс-форме. Помимо этого, использование воды в модельном составе снижает расход модельного состава на производство моделей.

Существенным недостатком водонаполненного модельного состава является сложность сборки модельных блоков. Дело в том, что сборку (монтаж) модельных блоков, за исключением способа звеньевой сборки модельных блоков, как правило, осуществляют методом припаивания элементов ЛПС к модели отливки. При этом температура ножа или лезвия паяльника, используемого для припаивания элементов модельного блока, как правило, превышает 100°C. Соответственно, при контакте воды с поверхностью ножа или лезвия паяльника, вода, находящаяся в модельном составе, быстро нагревается и испаряется, проходя стадию кипения. В это же время прилегающий к месту припаивания модельный состав также находится в жидком состоянии, что приводит к интенсивному выбросу жидкого модельного состава из-под ножа или лезвия, образованию в модельном составе, в месте сплаивания, паро-воздушных пузырей и, в конечном счёте, низкой прочности и качеству соединения. Кроме того, не обладая прочностью, вода, находящаяся в модельном составе, понижает прочность модели.

В связи с этим использование жидкого наполнителя (воды) в модельном составе можно рекомендовать в исключительных случаях, когда достижение положительного результата по качеству моделей отливок другими способами оказывается невозможным.

**Твёрдый наполнитель.** В модельном составе твёрдый наполнитель может находиться в состоянии поставки модельного состава или вводиться в него непосред-



ственно в литейном цехе в процессе подготовки модельного состава к запрессовке в пресс-форму.

Твёрдые наполнители могут быть абсолютно нерастворимыми, ограниченно растворимыми и полностью растворимыми в жидкой воскоподобной составляющей модельного состава. В зависимости от типа и количества используемого твёрдого наполнителя модельный состав может приобретать самые различные свойства.

В общем случае твёрдый наполнитель существенно повышает прочность модельного состава, понижает его линейную усадку и незначительно уменьшает склонность к образованию утяжин в моделях. Помимо этого, наличие твёрдого наполнителя в модельном составе значительно повышает его технологичность и позволяет проводить запрессовку пастообразного модельного состава в пресс-форму практически при любом давлении.

Наполнители, нерастворимые в жидкой воскоподобной составляющей модельного состава, классифицируют по форме частиц, разделяя при этом наполнители на зернистые и волокнистые. В свою очередь, зернистые наполнители делят на крупнозернистые, с величиной гранул (зёрен) от 0,1 до 0,3 мм и мелкодисперсные, с величиной зёрен менее 100 мкм. Как правило, количество зернистого твёрдого наполнителя нерастворимого в жидкой восковой части модельного состава, составляет 28...32%, по объёму.

Твёрдые нерастворимые наполнители, в зависимости от типа модельного состава, должны соответствовать следующим требованиям:

- плотность материала наполнителя не должна отличаться от плотности жидкой воскоподобной части модельного состава более чем на 10...15%;
- материал наполнителя не должен растворяться в жидкой воскоподобной части модельного состава и образовывать с ней химических соединений;
- материал наполнителя должен хорошо смачиваться воскоподобной составляющей модельного состава;
- материал наполнителя не должен растворяться в воде, спиртах и других растворителях, используемых для обезжиривки поверхности модельных блоков, а также входящих в состав огнеупорной суспензии, используемой для изготовления КО (ГО, формы);
- материал наполнителя не должен быть гигроскопичным;
- материал наполнителя должен иметь низкую величину зольности;
- материал наполнителя должен иметь температуру плавления более высокую (не менее чем на 50°C), чем максимальная температура модельного состава, который он достигает в период подготовки или выплавления из КО;
- материал наполнителя должен иметь температуру деструкции не менее чем на 100°C ниже, чем температура прокаливания КО;
- материал наполнителя и продукты его деструкции должны быть нетоксичными, взрывобезопасными.

За рубежом в качестве твёрдого нерастворимого наполнителя модельных составов в настоящее время всё большее распространение получает полистирол, как материал, наиболее полно отвечающий вышеперечисленным требованиям к твёрдым наполнителям.

В отечественных модельных составах в качестве твёрдого зернистого нерастворимого наполнителя, в основном, используют карбамид (мочевину), значительно реже графит коллоидальный, уротропин и т.п. Из числа волокнистых материалов наибольшее распространение в качестве наполнителя получил – поливинилацетат целлюлозы. Значительно реже в качестве волокнистого наполнителя используют, изготовленную из полиамида (капрон), полиуретана (спандекс) и т.п. В отличие от зернистого твёрдого наполнителя, количество волокнистого наполнителя в

модельном составе не рекомендуется увеличивать более 25% (по объёму) в связи с существенным понижением реологических свойств модельного состава.

Существенным недостатком модельных составов, содержащих нерастворимый твёрдый наполнитель с плотностью, близкой к плотности восковой части модельного состава, является невозможность их регенерации и, соответственно, невозможность повторного использования для производства моделей отливок.

Основные требования к твёрдому наполнителю, ограниченно растворимому в жидкой воскоподобной части модельного состава, аналогичны вышеприведённым, с той лишь разницей, что материал наполнителя должен быть частично растворимым, в воскоподобной части модельного состава, находящейся в жидком состоянии. Соответственно, для наполнителя, полностью растворяющегося в жидкой воскоподобной части модельного состава, одним из основных требований, является выделение микросталлов материала наполнителя в самостоятельную (твёрдую) фазу при переходе восковой части модельного состава из жидкого состояния в твёрдое.

### 5.3. Классификация, характеристика и свойства модельных составов

В цехах, производящих литьё методом выплавляемых моделей, для изготовления моделей используют выплавляемый модельный состав (составы) с определённым комплексом свойств, обеспечивающих требуемое качество моделей и отливок в условиях конкретного производства.

В цехах крупносерийного и массового производства мелкого и среднего литья, как правило, используют одну марку модельного состава. В цехах мелкосерийного и серийного производства при производстве отливок массой от нескольких граммов до десятков килограммов зачастую использование модельного состава одной марки становится весьма проблематичным. Как правило, это связано с тем, что, требования к свойствам модельного состава, используемого для изготовления моделей отливок различной номенклатуры, могут быть настолько различными, что их требуемое сочетание в одном модельном составе достичь либо невозможно, либо такой "единый" модельный состав будет иметь неоправданно высокую стоимость. Поэтому, использование нескольких марок модельных составов в одном цехе – явление нередкое и оправданное. При этом количество одновременно используемых марок модельных составов может достигать до 5-ти и более.

Следует отметить, что для достижения требуемого качества моделей, зачастую непосредственно в цехе, в модельный состав дополнительно вводят не только определённые компоненты (петролатум, церезин, триэтаноламин, наполнители и др.), но и смешивают между собой модельные составы разных марок.

Необходимость использования в одном цехе нескольких марок модельных составов диктуется различными обстоятельствами. В качестве примера можно привести ситуацию, когда в цехе изготавливают модели на установках различного типа. Например, для изготовления мелких моделей в цехе используют автоматы карусельного типа (мод. 61201А), а для изготовления крупных, относительно толсто-стенных, моделей отливок используют пневматический (стендовый) пресс или шприц-машину мод. 659А. Для изготовления моделей на пневматическом прессе по своим технологическим свойствам (продолжительное затвердевание в пресс-форме, высокая пластичность, низкая твёрдость) наиболее приемлемыми являются парафиностеариновые составы. В то же время данные составы, по показателям тех же свойств, оказываются непригодными для использования в автоматах карусельного типа, для которых наиболее приемлемыми являются модельные составы типа P-3, KC-3, KC-5P, KC-5A, MBC и т.п.



Помимо вышеописанного случая, к числу причин, вызывающих необходимость использования в цеке нескольких марок модельных составов, относятся: значительная разнородность номенклатуры отливок (по толщине стенок, габаритным размерам, массе и др.); использование различных способов сборки моделей (например, способа пайки для воскоподобных модельных составов и способа склеивания для модельных составов на основе смол); существенные различия в требованиях к качеству моделей отливок (например, для отливок товаров широкого потребления и к качеству моделей специального назначения); снижение затрат на дорогостоящий модельный состав одноразового применения (например, путём изготовления моделей отливок из дорогостоящего высокотехнологичного модельного состава и изготовление моделей ЛПС из менее дорогостоящего и менее технологичного модельного состава); использование пресс-форм, размеры рабочих полостей которых рассчитаны исходя из различной величины усадки модельного состава; значительные годовые изменения температуры воздуха в отделениях изготовления моделей и КО и т.п.

Известные марки модельных составов обладают достаточно разнообразными свойствами и разработаны для различной номенклатуры и условий производства. Выбор той или иной марки модельного состава проводят исходя из конкретных условий и серийности производства, оборудования и используемой оснастки, номенклатуры и требований к качеству литья и т.п. То есть выбор конкретной марки модельного состава проводят на основе определённого комплекса требований к его свойствам, ранжированных по уровню значимости.

Проводя поиск требуемого модельного состава, важно знать к какому классу относится искомый модельный состав, поскольку данная информация существенно сокращает и облегчает процесс поиска. В работе [232] представлена классификация выплавляемых модельных составов, используемых для получения монолитных моделей методом запрессовки пастообразного модельного состава в пресс-форму.

Данная классификация (см. табл. 5.9...5.12) основана на следующих признаках модельных составов: природа материала-основы модельного состава (группа); вид наполнителя, присутствующего в пастообразном модельном составе (подгруппа); температура запрессовки пастообразного модельного состава в пресс-форму (тип); величина коэффициента свободной линейной усадки модельного состава (разряд).

Таблица 5.9

### Классификация модельных составов по материалу-основе

Группа	Модельные составы (сплавы)
1	Сплавы на основе предельных углеводородов (парафин, церезин)
2	Сплавы на основе минеральных восков (воск буроугольный, торфяной, горный)
3	Сплавы на основе смол природного происхождения
4	Сплавы на основе синтетических восков и смол
5	Сплавы металлические легкоплавкие. Металл с низкой температурой плавления (ртуть).

Таблица 5.10

### Классификация модельных составов по применяемому наполнителю

Подгруппа	Вид наполнителя в пастообразном модельном составе
1	Без наполнителя
2	Газообразный (воздух)
3	Жидкий (дистиллированная вода)
4	Твёрдый, нерастворимый в жидком пластификаторе
5	Твёрдый, ограниченно растворимый в жидком пластификаторе
6	Твёрдый, не ограниченно растворимый в жидком пластификаторе

Таблица 5.11  
Классификация модельных составов по температуре их запрессовки в пресс-форму

Тип	Температура запрессовки модельного состава в пресс-форму, °С
A	$t_1 < 54$
B	$54 \leq t_1 \leq 100$
C	$t_1 > 100$

Таблица 5.12  
Классификация модельных составов по величине их свободной линейной усадки

Разряд	Величина свободной линейной усадки модельного состава, %
1	$\alpha_m < 0,85$
2	$0,85 \leq \alpha_m \leq 1,15$
3	$\alpha_m > 1,15$

Используя четыре вышеуказанных классификационных признака, все наиболее известные выплавляемые модельные составы можно объединить в классы, в обозначении которых первая цифра соответствует группе модельного состава (см. табл. 5.9), вторая цифра – подгруппе (см. табл. 5.10), буква – типу (см. табл. 5.11), последняя цифра – разряд (см. табл. 5.12). Например, к классу 12A1 относятся модельные составы, изготовленные на основе парафина или церезина, содержащие в пастообразном состоянии воздух, запрессовываемые в пресс-формы при температуре менее 54°С и имеющие величину свободной линейной усадки менее 0,85%.

**Класс 12A1.** Основу модельных составов данного класса составляет парафино-стеариновый сплав. Содержание компонентов в наиболее известных парафино-стеариновых модельных составах и их свойства приведены в табл. 5.13 и табл. 5.14 соответственно.

Таблица 5.13

### Содержание компонентов в модельных составах класса 12A1

Марка модельного состава	Содержание компонентов, % (по массе)			
	парафин	стеарин	этилцеллюлоза	буроугольный воск
ПС 50-50	50	50	-	-
ПС 70-30	70	30	-	-
ПЭС 50-30-20	50	20	-	30
ПСЭ 70-25-5	70	25	5	-

Таблица 5.14

### Свойства модельных составов класса 12A1

Марка модельного состава	Показатели					
	$\sigma_{II}$ МПа	$\alpha_m$ , %	$t_r$ , °С	$M_3$ , % (по массе)	$\Delta t_p$ , °С	$t_k$ , °С
ПС 50-50	1,6–2,0	0,3–0,4	28	0,02	42–43	47,5
ПС 70-30	1,6–2,0	0,4–0,5	28	0,02	44–45	49
ПЭС 50-30-20	2,5–3,1	0,5–0,6	30	0,03	46–50	71,5
ПСЭ 70-25-5	2,3–2,7	0,3–0,6	30	0,02	44–47	50

*Примечание.*  $\sigma_{II}$  – предел прочности при статическом изгибе при 19±1°С (не менее);  $\alpha_m$  – свободная линейная усадка при отсутствии воздуха в модельном составе;  $t_r$  – теплоустойчивость (не менее);  $M_3$  – зольность или массовая доля золы (не более);  $\Delta t_p$  – температурный интервал пастообразного состояния модельного состава;  $t_k$  – температура каплепадения по Уббе-лоде.

Одними из первых модельных составов, нашедших самое широкое применение в промышленных условиях производства моделей, были двухкомпонентные парафино-стеариновые составы (ПС) с содержанием парафина от 50% до 70% (по массе). Данные составы характеризуются высокой текучестью, пластичностью, низкой твердостью и величиной усадки, что позволяет запрессовывать их при невысоком давлении (до 0,2 МПа), используя пневматические, гидравлические, рычажные прессы или ручные шприцы.

Как правило, подготовка составов типа ПС к прессованию состоит в расплавлении модельного состава и замешивании в него мелкой стружки, приготвленной из



этого же модельного состава, либо понижению температуры жидкого состава до 42...47°C при его непрерывном перемешивании, до получения однородной пастообразной массы. При этом в процессе перемешивания и охлаждения, в пастообразный состав непроизвольно, в виде мелких пузырьков, замешивается определенное количество воздуха (до 20 %, по объему).

Наличие воздуха в модельном составе способствует снижению величины свободной линейной усадки моделей до 0,20...0,35%. Поскольку температура подготовленного к запрессовке пастообразного состава типа ПС находится в пределах от 42 до 47°C, то, в отсутствие механизации, его можно вымешивать руками, не используя индивидуальные средства защиты рук от ожогов.

На предприятиях, выпускающих тонкостенное литье или использующих автоматизированные пресс-формы, использование модельных составов типа ПС оказалось невозможным. Это связано, во-первых, с низкой скоростью затвердевания и охлаждения моделей, приводящей к деформации тонкостенных моделей, во-вторых, из-за недостаточной прочности модельного состава, приводящей к массовому браку моделей по поломкам в процессе выталкивания моделей толкателями из рабочих полостей автоматизированных пресс-форм, а также при нанесении огнеупорного покрытия на модельные блоки на автоматических линиях. Кроме того, низкая теплоустойчивость модельных составов типа ПС не обеспечивает требуемой точности формы тонкостенным моделям, а невозможность повышения давления запрессовки воздушноаполненного пастообразного модельного состава не обеспечивает требуемую чистоту поверхности моделей и, соответственно, отливок. Стремление повысить теплопроводность, прочность и теплоустойчивость составов типа ПС привело к их дополнительному легированию более тугоплавкими и твердыми материалами органического происхождения. Из числа наиболее известных тугоплавких и твердых материалов наибольшее распространение получили: этилцеллюлоза, буруогольный воск, церезин, канифоль, полиэтиленовый воск. Использование в составах типа ПС данных материалов повысило их прочность и теплоустойчивость, однако не позволило достичь требуемого уровня свойств в полном объеме.

Кроме того, существенным недостатком составов типа ПС является омыление стеарина, происходящее в процессе выплавления модельного состава из КО в воде и являющееся причиной ухудшения качества поверхности отливок. Дело в том, что при контакте с водой стеарин модельного состава, взаимодействуя с ионами натрия и калия, присутствующими в воде, образует химическое соединение – стеарат натрия или калия (мыло). Образовавшееся в процессе выплавления модельного состава мыло, частично оседает на рабочей поверхности КО, обезживается при прокаливании КО, но не удаляется с её поверхности. В результате в местах скопления мыла поверхность отливок приобретает повышенную шероховатость, а на поверхностях стальных отливок может образоваться химический пригар. В связи с вышеизложенным, выплавление модельных составов, содержащих стеарин, проводят в воде, подкисленной соляной или какой-либо другой кислотой, из расчёта получения воды с величиной водородного показателя pH=5. Следует отметить, что низкая твердость и теплопроводность модельных составов типа ПС, в определённых условиях получения моделей, играют положительную роль. Уровень указанных свойств, неприемлемый для производства моделей на автоматизированных пресс-формах, тем не менее, позволяет получать крупногабаритные толстостенные модели с удовлетворительным качеством поверхности на ручных или механизированных пресс-формах. Дело в том, что при относительно невысокой, массовой скорости поступления модельного состава в рабочую полость пресс-формы толстостенной модели в процессе запрессовки высокотеплопроводные модельные составы успевают потерять текучесть. В результате на поверхности модели образуется множество

спаев и раковин. В то же время низкопроводные пластичные модельные составы типа ПС, к моменту окончания заполнения пресс-формы модельным составом, сохраняют свою текучесть, что позволяет получать толстостенные модели с достаточно высокой чистой поверхностью, без дефектов.

В настоящее время модельные составы типа ПС используют ограниченно, в основном, в литейных цехах с небольшим объемом выпуска литья из легкоплавких цветных сплавов, толстостенного стального литья, мелкого литья для ремонтных нужд или для товаров широкого потребления. Составы типа ПС, как правило, изготавливают непосредственно в литейных цехах, используя для этого стеарин и парафин технической чистоты. На технологические свойства модельных составов типа ПС наиболее заметное влияние оказывает качество используемого стеарина. В частности, замена стеарина (смеси стеариновой, пальмитиновой и олеиновой кислот) на стеариновую кислоту приводит к повышению брака моделей по трещинам и спаям, понижению прочности модельного состава и т.п.

**Классы 12В1 и 12В3.** С развитием механизации и автоматизации производства литья, расширением номенклатуры отливок и повышением требований к ним, соответственно, возросли и требования к свойствам модельных составов. От модельных составов потребовалось повышение точности формы, прочности, теплоустойчивости, теплопроводности, твердости и т.п. В связи с этим были разработаны бесстеариновые модельные составы марок Р-3 (класс 12В1), МВС-15 и МВС-3А (класс 12В3), ориентированные на изготовление моделей на запрессовочных устройствах, использующих автоматизированные пресс-формы и развивающих давление прессования до 0,2 МПа.

В отличие от парафиностеариновых составов, модельные составы данных классов обладают более высокой твердостью, теплоустойчивостью и прочностью, не склонны к омылению при выплавлении их в воде с водородным показателем pH≤5. В отличие от модельного состава Р-3, составы типа МВС, содержащие полиэтиленовый воск, обладают более высокой свободной линейной усадкой и повышенной склонностью к образованию утяжин в моделях. Во избежание этого, при подготовке модельных составов типа МВС к запрессовке их насыщают большим, по сравнению с модельным составом Р-3, количеством воздуха. Температура запрессовки этих модельных составов в пресс-формы – 54...65°C, что не позволяет проводить подготовку (вымешивание) этих модельных составов к запрессовке вручную.

Содержание компонентов в некоторых модельных составах классов 12В1 и 12В3 и их свойства приведены в табл. 5.15 и табл. 5.16, соответственно.

Таблица 5.15

**Содержание компонентов в модельных составах классов 12В1 и 12В3**

Класс модельного состава	Марка модельного состава	Содержание компонентов, % (по массе)							
		парафин	церезин	буруогольный воск	торфяной воск	**К <sub>0</sub>	Полиэтиленовый воск	сополимер этилена с винилацетатом	защитный воск
12В1	Р-3 (ПЦБКО 58-24-13-5)	58	24 (с)*	13		5			
	ПБТ 70-20-10	70	20		10				
	ПБЦ 59-12-29	59	29 (н)	12					
12В3	МВС-15	57,8	35 (с)				7,2		
	МВС-3А	45	40 (с)				15		
	ПЦЗв3вПв	55	5-25 (с)				2-8	2-15	5-20

Примечание. \*с – церезин синтетический, высокоплавкий, н – церезин нефтяной.

\*\*К<sub>0</sub> – кубовый остаток термического крекинга парафина.



Свойства модельных составов класса 12В1 и 12В3

Таблица 5.16

Класс модельного состава	Марка модельного состава	Показатели					
		$\sigma_{и}$ , МПа	$\alpha_{м}$ , %	$t_{г}$ , °С	$M_{з}$ , % (по массе)	$\Delta t_{г}$ , °С	$t_{к}$ , °С
12В1	Р-3	3,4–3,9	0,6–0,9	34	0,03	54–59	77–84
	ПБТ 70-20-10	3,6–4,2	0,6–0,9	34	0,05	54–57	73
	ПБЦ 59-12-29	3,0–3,5	0,6–0,9	32	0,03	54–59	77–80
12В3	МВС-15	4,5	1,2–1,5	37	0,03	54–62	79–83
	МВС-3А	5,0	1,1–1,5	40	0,03	54–63	75–9
	ПЦС <sub>эв3</sub> П <sub>в</sub>	4,5–5,0	1,3–1,6	50	0,03	54–68	87–90

В настоящее время взамен модельного состава марки Р-3 производят модельные составы марок КС-5Р, КС-5А, КС-3, К-2, К-2М(а), К-2М(о) и др., взамен модельных составов МВС-15 и МВС-3А производятся модельные составы марок МС-В, МВС-3Н, Велен-1 и др.

Свойства некоторых модельных составов классов 12В1 и 12В3 приведены, соответственно, в табл. 5.17 и табл. 5.18.

Свойства модельных составов класса 12В1

Таблица 5.17

Марка модельного состава	Показатели				
	$\sigma_{и}$ , МПа	$\alpha_{м}$ , %	$t_{г}$ , °С	$M_{з}$ , % (по массе)	$t_{к}$ , °С
КС-5А	4,5–6,2	0,6–0,9	37	0,07	75–85
КС-5Р	4,7–5,1	0,6–0,9	34	0,07	75–85
КС-3	2,8–3,0	0,6–0,9	30	0,07	72–78
ПЦБ 56-32-12	≥4,0	0,6–0,9	30	0,03	75–80

Свойства модельных составов класса 12В3

Таблица 5.18

Марка модельного состава	Показатели				
	$\sigma_{и}$ , МПа	$\alpha_{м}$ , %	$t_{г}$ , °С	$M_{з}$ , % (по массе)	$t_{к}$ , °С
МС-В	≥4,5	1,0–1,5	37	0,03	75–80
МВС-3Н	≥4,0	1,0–1,5	37	0,03	75–85
Велен-1	≥5,0	0,9–1,5	37	0,02	~85
К-2М(о)	≥2,0	0,9–1,4	28	0,15	75–90
К-2М(а)	≥2,5	0,9–1,4	30	0,15	75–90
К-2	≥3,0	1,0–1,5	32	0,15	75–90

Модели из составов данных классов изготавливают из пастообразного модельного состава, с замешиванием в него строго дозированного количества воздуха. Количество замешиваемого воздуха в составах класса 12В1 составляет от 13% до 22% (по объёму), а в модельных составах класса 12В3 – 20...32%.

В пределах одного класса модельные составы разных марок могут существенно различаться физическими и технологическими свойствами. Например, состав КС-5А, наряду с высокой прочностью, имеет небольшую усадку, достаточно высокую теплоустойчивость и весьма низкую склонность к образованию утяжин в моделях, что особенно важно при производстве моделей в летнее время (в условиях повышенной температуры воздуха в цехе). В то же время модельный состав КС-3, имея невысокую теплоустойчивость, прочность и твёрдость, обладает большой пластичностью, вязкостью и ориентирован для использования в цехах с нерегулируемой

температурой воздуха, в отделениях изготовления моделей и нанесения огнеупорного покрытия на модельные блоки в зимнее время.

Наибольшую усадку и склонность к образованию утяжин в моделях, из числа вышеописанных модельных составов, имеют составы класса 12В3 (МВС-15, МВС-3А и т.п.). Для уменьшения усадки в составы данного класса замешивают большее (до 32%) количество воздуха. С этой же целью В.А. Рыбкин и Е.М. Костицын рекомендуют увеличить содержание воздуха в модельных составах типа МВС до 40...50% при одновременном уменьшении размера воздушных пузырьков до 20...30 мкм.

Первичные (исходные) модельные составы данных классов используют совместно с возвратом и без него. Практически для всех известных модельных составов характерным является повышение их технологических свойств при использовании первичного модельного состава совместно с его возвратом. С увеличением доли возврата в первичном модельном составе стабилизируются размерная точность моделей, понижается склонность модельного состава к образованию утяжин и трещин в моделях, модельный состав становится более однородным, текучим, пластичным, в моделях улучшается воспроизводимость контуров рабочих поверхностей пресс-формы.

Причиной таких изменений, по-видимому, является насыщение модельного состава продуктами его частичного окисления, происходящего в процессе технологического цикла подготовки модельного состава к запрессовке в пресс-формы и выплавлению из КО.

Доля возврата в первичном модельном составе, используемом для изготовления моделей отливок общемашиностроительного назначения, может достигать 70% (по массе). Для отливок товаров широкого потребления допустимо изготовление моделей из 100% возврата модельного состава.

**Класс 11В3.** В отличие от модельных составов с узким ( $\Delta t_{г} < 5^{\circ}\text{C}$ ) и средним ( $5 \leq \Delta t_{г} \leq 12^{\circ}\text{C}$ ) температурным интервалом пастообразного состояния, широкоинтервальные ( $\Delta t_{г} > 12^{\circ}\text{C}$ ) модельные составы при их запрессовке в пресс-формы в пастообразном состоянии воздухом не насыщают. Напротив, наличие воздуха в таких модельных составах крайне нежелательно. Дело в том, что данный класс модельных составов используют, в частности, для получения сложных тонкостенных (толщина стенок от 0,5 мм) моделей с высокой чистотой поверхности и размерной точностью, конструкция которых нередко предполагает использование тонкостенных керамических стержней.

Достичь высокого уровня чистоты поверхности модели, изготовленной из воздушнонаполненного модельного состава, не представляется возможным в связи с вынужденным ограничением давления запрессовки по вышеописанным причинам. Кроме того, использование вакуумно-аммиачной сушки слоёв огнеупорного покрытия на модельном блоке не позволяет использовать воздушнонаполненные модели в связи с их разрушением или вздутием поверхности в период создания вакуума в сушильной камере при сушке первого слоя огнеупорного покрытия. Поэтому для обеспечения высокой чистоты поверхности моделей и обеспечения заполняемости пресс-форм используют широкоинтервальные модельные составы, не содержащие воздуха в пастообразном состоянии.

В составах на основе парафина или церезина увеличения температурного интервала пастообразного состояния достигают, в основном, за счёт ввода в них полимерных материалов (полиэтиленового воска, полиизотилена и т.п.). Кроме того, в число компонентов данных модельных составов могут входить смола нефтеполимерная, церезин нефтяной, воск буроугольный и др.

Свойства некоторых модельных составов класса 11В3 приведены в табл. 5.19.



Свойства модельных составов класса 11В3

Таблица 5.19

Марка модельного состава	Показатели				
	$\sigma_{и}$ , МПа	$\alpha_{м}$ , %	$t_{г}$ , °С	$M_{з}$ , % (по массе)	$t_{к}$ , °С
ЗГВ-101	5,0-7,0	1,0-1,35	38	0,10	85-95
ЗГВ-102	5,0-7,0	1,0-1,35	36	0,10	85-95
ЗГВ-103	5,5-6,5	1,0-1,45	40	0,10	85-90

Примечание. Производитель модельных составов типа ЗГВ – завод горного воска (Беларусь).

**Класс 14В1.** С целью снижения величины линейной усадки в пастообразные модельные составы, не содержащие воздух, вводят твёрдый наполнитель. В качестве наполнителя используют, например, порошок карбамида, хлористого аммония, ультрадисперсный порошок полистирола или поливинилатетат целлюлозы (волокнистый наполнитель) и т.п.

Восковой основой (пластификатором) для модельных составов данного класса, как правило, служат модельные составы с широким температурным интервалом пастообразного состояния.

Свойства некоторых модельных составов класса 14В1 приведены в табл. 5.20.

Свойства некоторых модельных составов класса 14В1

Таблица 5.20

Марка модельного состава	Показатели				
	$\sigma_{и}$ , МПа	$\alpha_{м}$ , %	$t_{г}$ , °С	$M_{з}$ , % (по массе)	$t_{к}$ , °С
Велен	6,0	0,6-0,9	44	0,02	88
Велен-2	7,0	0,4	44	0,04-0,07	88

Применение твёрдого наполнителя в модельных составах данного класса, по сравнению с модельными составами класса 11В3, позволяет значительно понизить величину свободной линейной усадки и незначительно снизить их склонность к образованию утяжин в моделях. Однако наличие наполнителя в модельном составе понижает его текучесть и увеличивает опасность разрушения тонких керамических стержней при запрессовке модельного состава в пресс-форму.

Необходимо отметить, что, как и у модельных составов типа ЗГВ, использование относительно больших количеств полимерных материалов может приводить к расщеплению модельного состава при его длительной выдержке в жидком состоянии без непрерывного перемешивания.

Модельные составы класса 14В1, в связи с наличием в их составе твёрдого наполнителя, практически не регенерируемы и, как правило, вторично не используют для изготовления моделей отливок ответственного назначения.

**Класс 21В2.** Для предупреждения образования утяжин в моделях и обеспечения требуемого уровня точности формы модельный состав должен обладать высокой теплопроводностью, твёрдостью и жёсткостью. Кроме того, для обеспечения получения высокой чистоты поверхности моделей и предупреждения разрушения тонких керамических стержней при запрессовке модельного состава в пресс-форму модельный состав должен иметь достаточно широкий интервал пастообразного состояния и обладать хорошей текучестью.

К числу модельных составов, наиболее полно отвечающих вышеперечисленному комплексу требований, относятся модельные составы класса 21В2, марок В-1, ВИАМ-102, Romonta PW (Германия) и др., изготовленные на основе минеральных восков природного происхождения (буроугольный, торфяной). Составы данного класса, в основном, были разработаны для производства моделей отливок типа турбинных лопаток, а также тонкостенных фасонных отливок ответственного назна-

чения, где требуется высокая чистота поверхности, размерная точность и точность формы.

В отличие от модельных составов классов 12В3, 11В3 и 14В1, где увеличения температурного интервала пастообразного состояния достигают за счёт ввода в модельный состав полимерных материалов, в модельных составах на основе минеральных восков увеличения данного параметра достигают за счёт введения триэтанолламина. Количеством вводимого в состав триэтанолламина решают не только вопросы увеличения температурного интервала пастообразного состояния, но и регулирование твёрдости и пластичности модельного состава.

Содержание компонентов и свойства некоторых модельных сплавов класса 21В2 приведены в табл. 5.21 и табл. 5.22 соответственно.

Содержание компонентов в модельных составах класса 21В2

Таблица 5.21

Марка модельного состава	Содержание компонентов, % (по массе)			
	парафин	буроугольный воск	торфяной воск	триэтанолламин
В-1	25	45	25	
ВИАМ-102	25	35	35	5

Примечание. Производитель модельных составов В-1 и ВИАМ-102 – завод горного воска (Беларусь).

Свойства модельных составов класса 21В2

Таблица 5.22

Марка модельного состава	Показатели					
	$\sigma_{и}$ , МПа	$\alpha_{м}$ , %	$t_{г}$ , °С	$M_{з}$ , % (по массе)	$\Delta t_{п}$ , °С	$t_{к}$ , °С
В-1	4,8-5,2	0,9-1,20	40	0,20	54-70	82-87
ВИАМ-102	4,6-5,0	0,9-1,15	40	0,15	54-68	80-85

Общим недостатком для всех модельных составов, изготовленных на основе материалов природного происхождения, является нестабильность их технологических свойств, в частности, трещиностойчивость и размерная точность. Дело в том, что свойства материалов природного происхождения находятся в прямой зависимости от достаточно большого числа непредсказуемых природных факторов. Например, свойства буроугольного и торфяного воска во многом зависят от их состава, в частности, от соотношения содержания в них восковой и смолистой составляющей, содержание которых, изменяется в довольно широких пределах от партии к партии материалов.

Модельные составы класса 21В2 обладают низкой вязкостью в жидком состоянии, вследствие чего, становится возможным их повторное использование, после регенерации. Для особо ответственных отливок, работающих в узлах и агрегатах аэрокосмической техники, модели отливок изготавливают только из первичных модельных составов. В отдельных случаях допускается использование в первичном модельном составе до 50% возврата, прошедшего регенерацию.

**Класс 24В1.** Как было отмечено выше, понизить усадку модельного состава, при всех прочих равных условиях, можно путём ввода в модельный состав твёрдого наполнителя, нерастворимого в воскоподобной основе модельного состава.

В качестве твёрдых наполнителей модельных составов данного класса используют порошок карбамида (технической мочевины), уротропина (гексаметилентетрамина), синтетических смол (например, акриловой смолы), полистирола, хлористого аммония, фталимида, коллоидного графита, сажи и др.

При выборе твёрдого наполнителя учитывают его плотность, гигроскопичность, зольность, фракционный состав, токсичность в исходном состоянии и при темпера-



туре прокаливания КО, смачиваемости воскоподобной частью модельного состава и др. при этом соотношение плотностей наполнителя и воскоподобной части модельного состава во многом предопределяет как стабильность самого модельного состава, так и возможность его вторичного использования. Плотность воскоподобной части модельного состава (пластификатора) в расплавленном состоянии, как правило, находится в пределах от 0,75 до 0,88 г/см<sup>3</sup>, плотность при 20°С составляет 0,9...1,0 г/см<sup>3</sup>. Если плотность материала наполнителя значительно больше плотности жидкой воскоподобной части модельного состава, то такой наполнитель после выплавления модельного состава из КО, за время охлаждения расплава модельного состава, оседает на дно бака-накопителя модельного состава. В результате модельный состав становится непригодным для повторного использования в изготовлении моделей отливок. По этой причине в период подготовки модельного состава класса 24В1 к запрессовке в пресс-форму недопустим чрезмерный нагрев жидкого модельного состава.

Выбрав тот или иной материал наполнителя, важно определить его количество в модельном составе. С точки зрения сохранения удовлетворительной текучести модельного состава и существенного понижения при этом величины линейной усадки моделей, количество твёрдого наполнителя рекомендуется рассчитывать по эмпирическому уравнению, % (по массе):

$$M_H = \frac{30 \cdot \rho_H}{\rho_P} \quad (5.5)$$

где  $\rho_H$  и  $\rho_P$  – плотность материала твёрдого наполнителя и воскоподобной части модельного состава при 20°С соответственно, г/см<sup>3</sup>.

Приготовление модельных составов класса 24В1 проводят непосредственно в литейном цехе, как правило, в электропечах ёмкостью до 0,05 м<sup>3</sup>, оснащённых механической мешалкой с малым числом оборотов. Для приготовления модельного состава с твёрдым наполнителем в качестве исходных компонентов берут, например, модельный состав ВИАМ-102 или КС-107-Б, а также карбамид, предварительно просушенный и измельчённый до пылевидного состояния.

Существенным недостатком карбамида, как наполнителя модельных составов, является его гигроскопичность. Использование недостаточно высушенного карбамида в модельном составе ухудшает качество поверхности моделей и, соответственно, отливок. Кроме того, длительное хранение моделей приводит к высаливанию карбамида на поверхности моделей в результате его взаимодействия с влагой воздуха. Появление кристалликов карбамида на поверхности модели впоследствии приводит к химическому взаимодействию карбамида с компонентами огнеупорной суспензии и понижению качества поверхности отливки. Кроме того, карбамид обладает более высокой плотностью, чем жидкая воскоподобная часть модельного состава, и ограниченно растворяется в ней с образованием смолоподобных соединений (биурета) [217].

**Класс 25В1.** Эмульсионные модельные составы были разработаны с целью уменьшения величины линейной усадки моделей, повышения прочности и жёсткости модельного состава; снижения гигроскопичности моделей, содержащих в качестве твёрдого наполнителя карбамид, и уменьшения взаимодействия модельного состава с гидролизovanым раствором этилсиликата.

Для приготовления эмульсионного модельного состава используют три компонента [195, 217]: воскоподобный модельный состав (пластификатор) с широким температурным интервалом пастообразного состояния (например, ВИАМ-102), твёрдый

наполнитель (карбамид) и эмульгатор (жидкое, поверхностно-активное вещество марки ОП-7 или ОП-10 в количестве 7...9%).

Эмульсионный модельный состав готовят следующим образом. В расплавленый модельный состав ВИАМ-102 вводят порошкообразный карбамид, эмульгатор и интенсивно перемешивают (эмульгируют). В процессе эмульгирования, благодаря присутствию в расплаве вещества-эмульгатора, происходит частичное растворение карбамида в модельном составе ВИАМ-102 (до 15...17% от массы карбамида). После образования эмульсии её переливают в изложницы и интенсивно охлаждают с целью фиксации в затвердевающем модельном составе нерастворившихся частиц карбамида.

Некоторые свойства эмульгированного модельного состава, изготовленного на основе модельного состава ВИАМ-102 [217], приведены в табл. 5.23.

Таблица 5.23  
Свойства эмульсионного модельного состава, приготовленного на основе ВИАМ-102

Свойства модельного состава	Содержание карбамида в модельном составе, % (по массе)										
	0	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80
$\alpha_m$ , %	0,9	0,65	0,55	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30	0,30	0,30
$\sigma_H$ , МПа	4,4	4,6	5,0	6,0	6,5	7,0	7,3	7,8	7,8	7,6	7,6
Температура модельного состава при запрессовке, °С	55	55	60	60	60	65	70	80	110	115	115

**Классы 16В1 и 26В2.** Модельные составы классов 16В1 и 26В2 в своём составе содержат твёрдый наполнитель, неограниченно растворяющийся в жидкой восковой основе модельного состава. Целью использования такого твёрдого наполнителя является возможность многократного использования модельного состава, повышение жёсткости, прочности и теплоустойчивости модельного состава, а также повышение качества поверхности моделей.

Содержание твёрдого наполнителя в модельных составах данных классов не превышает 5...10% (по массе) и, по механизму упрочнения воскоподобной основы модельного состава, они относятся к дисперсно-упрочнённым. Свойства некоторых модельных составов классов 16В1 и 26В2 приведены в табл. 5.24.

Таблица 5.24  
Свойства модельных составов класса 16В1 и 26В2

Класс	Марка модельного состава	Показатели					
		$\sigma_H$ , МПа	$\alpha_m$ , %	$t_H$ , °С	$M_3$ , % (по массе)	$\Delta t_H$ , °С	$\nu$ , сСт
16В1	КС-107-С	>5,5	0,4–0,6	40	0,07	54–63	12
26В2	КС-107-Б	>5,5	1,0–1,1	42	0,10	54–72	15

Примечание.  $\nu$  – кинематическая вязкость при 100°С.

В твёрдом состоянии в модельных составах данных классов наполнитель находится в восковой части в виде дендритоподобных кристаллов длиной до 100 мкм. При расплавлении модельного состава кристаллы наполнителя растворяются в его жидкой воскоподобной части. При последующем охлаждении расплава до определённой температуры растворимость наполнителя понижается, и он частично выделяется в расплаве в виде кристалликов (дендритов). В этот момент происходит повышение температуры расплава, а сам расплав превращается в структурированную



жидкость желобчатой консистенции. Дальнейшее охлаждение и перемешивание модельного состава приводит к разрушению дендритного "скелета" наполнителя, в результате чего модельный состав вновь приобретает текучесть.

Использование относительно небольшого количества твердого растворяющего-ся наполнителя в модельном составе не позволяет уменьшить его линейную усадку. Тем не менее, модельные составы данного класса обладают высокой текучестью, обеспечивают высокую чистоту поверхностей моделей и, в отличие от модельных составов с твердыми нерастворяющимися наполнителями, регенерируемы. Кроме того, их возможно использовать на любом типе оборудования для запрессовки модельного состава в пресс-формы, в том числе на установках, использующих подвод модельного состава к пресс-формам по обогреваемым пастопроводам. Из числа положительных качеств модельного состава КС-107-Б также следует выделить его крайне низкую склонность к образованию утяжин в моделях.

**Класс 31В1.** К классу 31В1 относятся модельные составы, изготовленные на основе природных смол. Наиболее известными модельными составами данной группы являются модельные составы МАИ-КТМ-500 и МАИ-500, состав и свойства которых приведены в табл. 5.25 и табл. 5.26 соответственно.

Таблица 5.25  
Содержание компонентов в модельных составах класса 31В1

Марка модельного состава	Содержание компонентов, % (по массе)				
	канифоль сосновая	церезин	битум	парафин	полиэтилен
МАИ-КТМ-500	85-89	1	1,4-0,7	11,3-7	2,3
МАИ-500	85-89	12-8	0,5	-	2,5

Таблица 5.26  
Свойства модельных составов класса 31В1

Марка модельного состава	Показатели				
	$\sigma_{и}$ , МПа	$\alpha_{м}$ , %	$t_{т}$ , °С	$M_3$ , % (по массе)	$\Delta t_{п}$ , °С
МАИ-КТМ-500	7-8	0,2-0,4	29	0,03	83-88
МАИ-500	8-9	0,40-0,43	32	0,03	83-88

Модельные составы данного класса обладают высокой прочностью и низкой величиной свободной линейной усадки, что способствует повышению размерной точности как изготавливаемых моделей отливок, так и самих отливок.

Существенным недостатком модельных составов данного класса является их низкая теплостойчивость и относительно низкий уровень технологичности.

**Класс 31С3.** К классу 31С3 относятся модельные составы, изготовленные на основе природных смол. Наиболее известными модельными составами данной группы являются модельные составы типа КПСЦ, состав и свойства которых приведены в табл. 5.27 и табл. 5.28 соответственно.

Таблица 5.27  
Содержание компонентов в модельных составах класса 31С3

Марка модельного состава	Содержание компонентов, % (по массе)		
	канифоль сосновая	церезин	полистирол
КПСЦ	50	20	30
КПСЦ-М	68-72	18-20	5-12

Таблица 5.28  
Свойства модельных составов класса 31С3

Марка модельного состава	Показатели				
	$\sigma_{и}$ , МПа	$\alpha_{м}$ , %	$t_{т}$ , °С	$M_3$ , % (по массе)	$\Delta t_{п}$ , °С
КПСЦ	>7,5	1,1-1,45	40	0,03-0,05	165-180
КПСЦ-М	>7,0	0,9-1,40	39	0,04-0,05	150-170

Модельные составы типа КПСЦ применяют там, где сборку отдельных частей модели проводят методом склеивания. Эти составы отличаются высокой температурой (165...180°С) и давлением (до 1 МПа) запрессовки, что объясняется высокой вязкостью жидких модельных составов, обусловленной наличием в их составе значительного количества полистирола. В связи с высокой температурой запрессовки данные модельные составы характеризуются высокой линейной усадкой, склонны к образованию в моделях значительных утяжин и трещин. При этом трещины в моделях из составов типа КПСЦ могут образовываться не только в процессе затвердевания и охлаждения модели, но и при её хранении.

Модельные составы данного класса обладают низкой склонностью к короблению и имеют относительно высокую теплостойчивость и твердость, хрупки. Высокая вязкость в жидком состоянии является основной причиной плохого удаления модельных составов при их выплавлении из КО. Помимо этого, высокая температура размягчения модельных составов типа КПСЦ является причиной частого разрушения недостаточно прочных КО.

Сборку моделей и модельных блоков из модельных составов класса 31С3 проводят склеиванием или пайкой. При этом зачастую модельный блок с моделями отливки, изготовленными из модельного состава 31С3, выполняют комбинированным, выполняя ЛПС из модельного состава класса 11В(1...3), 21В(1...3) и др.

**Класс 41В1.** Представителями модельных составов класса 41В1 являются модельные составы марок КС-111-С и КС-111-В, характеризующиеся низкой склонностью к короблению и образованию утяжин в моделях, низкой и стабильной усадкой, обладающей высокой трещиностойчивостью, в том числе и при хранении моделей в течение 3-х и более месяцев.

Запрессовку модельного состава в пресс-форму осуществляют в интервале температур от 63 до 67°С, получая при этом стабильную усадку, высокую чистоту поверхности и точность формы модели. Низкая вязкость модельных составов в жидком состоянии и отсутствие в них наполнителя позволяет регенерировать модельные составы и использовать их повторно, а также использовать в установках, где подача пастообразного модельного состава к пресс-формам осуществляется по обогреваемым пастопроводам. Модельные составы типа КС-111 не расслаиваются в жидком состоянии, сохраняя свои свойства при неоднократных нагревах до 200...220°С. Кроме этого, модели из модельных составов типа КС-111, также как и модели из модельного состава КПСЦ, можно склеивать между собой, используя те же материалы и технологию склейки.

Свойства некоторых модельных составов класса 41В1 приведены в табл. 5.29.

Таблица 5.29  
Свойства модельных составов класса 41В1

Марка модельного состава	Показатели					
	$\sigma_{и}$ , МПа	$\alpha_{м}$ , %	$t_{т}$ , °С	$M_3$ , % (по массе)	$\Delta t_{п}$ , °С	$v$ , с.СТ
КС-111-С	≥5,0	0,4-0,8	40-44	0,03-0,05	58-72	17-21
КС-111-В	≥7,0	0,4-0,6	42-55	0,03-0,06	58-72	18-25

Примечание. Модельные составы КС-111-С и КС-111-В производит ЧНПП "Карин-Сервис" (Украина).



**Класс 41B3.** Модельные составы группы 4 производят преимущественно фирмы Германии, Англии, США и др.

Модельные составы, изготовленные на основе синтетических восков (полиолефинов) и смол, используют, в основном, для получения моделей литниково-питающих систем.

Свойства некоторых модельных составов класса 41B3 приведены в табл. 5.30.

Свойства модельных составов класса 41B3

Таблица 5.30

Показатели					
$\sigma_w$ , МПа	$\sigma_m$ , %	$t_r$ , °C	$M_s$ , % (по массе)	$\Delta t_m$ , °C	$v$ , сСт
$\geq 5,0$	0,9–1,4	38–41	0,03–0,05	55–73	7,8–32

**Класс 44B2.** Модельные составы класса 44B2 производят на основе очищенных гидрокарбонатных восков, синтетических восков (полиолефинов), смол, с добавлением твёрдого наполнителя, в частности, ультрадисперсного порошка полистирола в количестве от 29 до 33% (по массе). Отличительной чертой данных модельных составов является их низкая склонность к образованию в моделях дефектов усадочного происхождения и высокая точность формы моделей.

Существенным недостатком данных модельных составов является их высокая вязкость в жидком состоянии, что делает их практически не регенерируемыми (одноразовыми). Кроме того, перегрев расплава модельного состава в процессе его приготовления или регенерации нередко приводит к необратимому увеличению склонности модельного состава к образованию трещин в моделях. Причём эта величина перегрева (температура пережога) для некоторых марок модельных составов превышает температуру запрессовки модельного состава в пресс-форму всего на 20...30°C.

В некоторых модельных составах данного класса используют твёрдый легкоплавкий наполнитель, частицы которого, при относительно невысоком перегреве расплава модельного состава, плавятся, коагулируют и выпадают в осадок.

Модельные составы данного класса централизованно производят предприятия Германии (Deumex, Beci Handlex), Англии (Remet, Blayson Olefines), США (Kindt Collins) и ряда других стран. Обобщённые свойства модельных составов класса 44B2 приведены в табл. 5.31.

Свойства некоторых модельных составов класса 44B2

Таблица 5.31

Показатели					
$\sigma_w$ , МПа	$\sigma_m$ , %	$t_r$ , °C	$M_s$ , % (по массе)	$\Delta t_m$ , °C	$v$ , сСт
$\geq 7,0$	0,6–1,3	$\geq 39$	0,02–0,05	56–73	56–110

**Класс 43B2.** Модельные составы данного класса, как правило, изготавливают на основе модельных составов класса 41B2 путём замешивания в них дистиллированной воды в количестве 25...35% (по массе). При этом вода в модельном составе находится в виде мелкодисперсных капелек диаметром 20...120 мкм. Для улучшения условий диспергирования воды в жидком модельном составе в некоторых случаях в неё вводят определённое количество поверхностно-активного вещества.

Использование воды взамен воздуха или твёрдого наполнителя позволяет, с одной стороны, увеличить давление запрессовки модельного состава до 0,3 МПа и более, с другой – обеспечивает высокую текучесть модельного состава.

Использование модельных составов данного класса позволяет получать модели с достаточно высокой размерной точностью и высокой точностью формы, снижая, при этом расход модельного состава одноразового использования на 10...30%.

Существенным недостатком модельных составов данного класса является проблематичность сборки модельных блоков методом пайки, а также сложности, связанные с ремонтом и обработкой моделей.

В настоящее время модельные составы данного класса на отечественных предприятиях не используют.

**Класс 51B1.** В исключительных (единичных) случаях для изготовления выплавляемых моделей используют легкоплавкие металлические сплавы, химический состав которых приведен в табл. 5.32.

Легкоплавкие металлические сплавы (класс 51B1)

Таблица 5.32

п/п	Состав сплава, % (по массе)				Температура плавления, °C	п/п	Состав сплава, % (по массе)				Температура плавления, °C
	Bi	Pb	Sn	Cd			Bi	Pb	Sn	Cd	
1	50,0 <sup>1</sup>	20,6	21,1	14,3	45,0	7	50,0	42,9	-	7,1	82,0
2	50,0 <sup>2</sup>	25,0	12,5	12,5	60,5	8	53,2	39,7	-	7,1	89,5
3	52,2	26,0	14,8	7,0	68,5	9	50,0 <sup>1</sup>	25	25	-	93,75
4	50,0	26,3	13,3	10,0	70,0	10	49,9	43,4	-	6,7	95,0
5	50,0	34,4	9,4	6,2	76,5	11	52,0	32,0	16,0	-	96,0
6	45,3 <sup>3</sup>	45,1	9,6	-	79	12	40,0	20,0	40,0	-	100,0

Примечание. <sup>1</sup> – сплав Гутри, <sup>2</sup> – сплав Вуда, <sup>3</sup> – сплав Д'Арсе, <sup>4</sup> – сплав Розе.

По сравнению с воскоподобными выплавляемыми моделями, модели из легкоплавких металлических сплавов имеют огромную прочность и теплоустойчивость, не склонны к образованию утяжин и используются только для получения особо точных моделей. Высокую размерную точность моделей обеспечивает висмут, являющийся основой всех сплавов, приведенных в табл. 5.32.

Природная способность висмута расширяться при кристаллизации делает усадку большинства указанных сплавов близкой к нулю. Нулевую усадку, например, имеет сплав Вуда.

Несмотря на преимущества перед модельными составами других классов, данные материалы имеют ряд существенных недостатков, в частности: высокую стоимость, плотность, сплавы интенсивно окисляются на воздухе в жидком состоянии. Применение легкоплавкого металлического сплава требует исключительно тщательного удаления его остатков из КО при выплавлении, поскольку при прокаливании эти остатки полностью окисляются и являются причиной образования поверхностных дефектов отливки.

Помимо легкоплавких металлических сплавов, за рубежом в исключительных, единичных случаях, модели отливают и ЛПС изготавливают из ртути. Изготовление моделей из ртути происходит путём её замораживания в пресс-форме.

На отечественных предприятиях ртуть в качестве модельного материала не используется, в частности, из-за её высокой токсичности.

#### 5.4. Изготовление модельных составов

**Изготовление воскоподобных модельных составов.** Модельные составы изготавливают в плавильных агрегатах с ёмкостью тигля от 0,05 (непосредственно в литейном цехе) до 3 м<sup>3</sup> (на специализированном предприятии-изготовителе модель-



ных составов). Схема одного из таких плавильных агрегатов (ёмкость плавильного бака 0,1 м<sup>3</sup>) представлена на рис. 5.3. Плавильный агрегат для выплавки (изготовления) модельного состава представляет собой стальной тигель 1 (бак), утепленный слоем теплоизоляционного материала 2 и оборезаемый элементами сопротивления 4. Плавильный бак установлен на подставке 5. В донной части плавильного агрегата выполнен кран пробкового типа 3 для слива приготовленного модельного состава из печи. Для проведения гомогенизации расплава плавильный агрегат оснащён механической мешалкой 7, понижающим редуктором 6 и электродвигателем.

Для приготовления модельного состава его компоненты предварительно измельчают до кусков с размером не более 50 мм и в соответствующих количествах загружают в тигель печи. В первую очередь в печь загружают наиболее тугоплавкие и измельчённые компоненты модельного состава, затем менее тугоплавкие компоненты.

После этого включают нагрев печи и нагревают содержимое тигля до 140...150°C. После полного расплавления компонентов шихты, температуру расплава понижают до 120...130°C и включают мешалку для проведения гомогенизации расплава.

При наличии в шихте модельного состава жидких компонентов (триэтаноламин, дибутилфталат и т.п.), их заливают в тигель тонкой струёй после полного расплавления твёрдых компонентов шихты, предварительно понизив температуру расплава до 110...120°C. После ввода жидких компонентов расплав тщательно перемешивают, поддерживая температуру в пределах 110...120°C. Длительность перемешивания (гомогенизации) расплава зависит от конструкции мешалки, скорости её вращения, а также ёмкости тигля плавильного агрегата, и составляет от 20...60 мин.

По окончании перемешивания приготовленный сплав сливают через кран пробкового типа 3. Параллельно со сливом жидкого модельного состава проводят его фильтрационную очистку. Для фильтрационной очистки используют фильтр, изготовленный из 3...6 слоёв марли, уложенной на металлической сетке № 020. Фильтрованный расплав разливают в противни или изложницы слоем до 50 мм, либо переливают в установку чешуирования или гранулирования модельного состава.

Несколько отлична от вышеописанной технологии технология приготовления модельного состава ПСЭ (70.25.5, по массе), который используют не только для изготовления моделей, но и в качестве присадки для сборки модельных блоков методом пайки.

Приготовление модельного состава ПСЭ осуществляют следующим образом. В плавильный бак загружают навеску стеарина (марка А), расплавляют её и повышают температуру расплава до 120...140°C. В расплав порционно, при его непрерывном перемешивании, вводят соответствующую навеску этилцеллюлозы. После полного расплавления этилцеллюлозы расплав при указанной температуре выдерживают в течение 20...30 мин, после чего в него вводят навеску парафина (марки П1, П2 или В5) и перемешивают до полного растворения парафина. Приготовленный расплав разливают в противни, где он охлаждается до комнатной температуры.

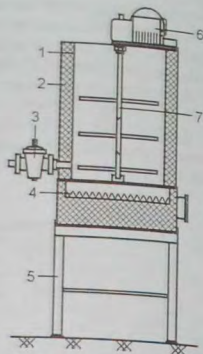


Рис. 5.3. Схема печи для выплавки модельных составов

**Изготовление модельных составов с твёрдым наполнителем.** Модельные составы с твёрдым наполнителем, как правило, готовят в печах с ёмкостью тигля от 0,05 до 0,70 м<sup>3</sup> и электрическим нагревом.

Процесс изготовления модельного состава, содержащего расплава восковой аналогичен процессу приготовления обычного модельного состава. Различие в технологии приготовления состоит в том, что после приготовления расплава восковой части модельного состава (пластификатора) его температуру доводят до 130...150°C и, установив задатчик температуры печи на температуру 100...115°C, порционно, при постоянном перемешивании расплава с частотой вращения мешалки 5...10 об/мин, в расплав вводят предварительно высушенный при температуре 110...120°C, тонкоизмельчённый (до размера частиц не более 50 мкм) и просеянный через сито с размером ячейки 1,0 мм, твёрдый наполнитель. По окончании ввода в расплав последней порции твёрдого наполнителя, расплав перемешивают 2...4 часа, после чего разливают в изложницы или противни слоем толщиной 5...15 мм или подают в установку для гранулирования модельного состава, или, понизив температуру массы до 65...75°C, используют для изготовления модельных отливок.

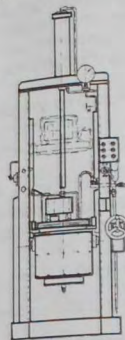


Рис. 5.4. Установка мод. 62П741

Одним из недостатков модельных составов с твёрдым нерастворимым наполнителем является склонность приготовленного состава к насыщению воздухом в процессе перемешивания наполнителя. Впоследствии, при изготовлении моделей, замешанные пузырьки воздуха в модельном составе могут явиться причиной брака моделей по воздушным раковинам. С целью удаления воздушных пузырьков из пастообразного модельного состава его вакуумируют.

В условиях мелкосерийного и серийного производства литья по выплавляемым моделям для приготовления как модельного состава без наполнителя, так и модельного состава с твёрдым наполнителем под вакуумом, используют установку мод. 62П741 (Изготовитель – ГУП «Тираспольский завод литейных машин им. С.М. Кирова», Молдова). Общий вид установки представлен на рис. 5.4, а её технические параметры приведены в табл. 5.33.

На установке мод. 62П741 выполняют следующие технологические операции: механическое перемешивание исходных компонентов, нагрев бака или теплоносителей от насосно-нагревательной станции либо электронагревателями, создание вакуума в баке, слив готового модельного состава в транспортную тару.

Для приготовления модельного состава без твёрдого наполнителя в установке мод. 62П741 его составляющие, предварительно измельчённые до кусков с размерами менее 50 мм, взвешивают и загружают в бак мешалки. Бак закрывают крышкой и включают обогрев. После полного расплавления введённых в плавильный бак установки ма-

Таблица 5.33

Технические параметры установки мод. 62П741

Параметры	Значения
Наибольшая производительность, м <sup>3</sup> /ч	0,05
Рабочая температура в баке, °C	120–160
Создаваемый вакуум, МПа	0,05–0,08
Расход сжатого воздуха (при давлении 0,5 МПа), м <sup>3</sup> /ч	0,2
Установленная мощность, кВт	7,3
Габаритные размеры, мм: длина × ширина × высота	980 × 780 × 2830
Масса, кг	1245



териалов включая мешалку и перемешивают расплав в течение 5...10 мин. После перемешивания отключают обогрев мешалки и охлаждают расплав до температуры, близкой к температуре его пастообразного состояния. По достижении расплавом необходимой температуры включают обогрев мешалки для поддержания постоянной температуры модельного состава и включают мешалку. Перемешивание ведут в течение одного часа, после чего модельный состав становится пригодным к использованию.

В случае необходимости приготовления модельного состава с твердым наполнителем, процесс аналогичен вышеописанному. Разница состоит в том, что в мешалку загружают определенные количества исходного модельного состава и твердого наполнителя. При этом твердый наполнитель при постоянном перемешивании вводят в жидкий модельный состав, перегретый на 50...70С выше температуры плавления пластификатора. После ввода твердого наполнителя в расплав модельного состава задатчик температуры в печи устанавливают на температуру запрессовки модельного состава в пресс-формы (60...67°С). Длительность перемешивания модельного состава с твердым наполнителем зависит от объема изготавливаемого модельного состава и составляет от 2 до 6 ч.

Качество модельного состава с твердым наполнителем (карбамидом) во многом зависит от влажности наполнителя. Чем меньше содержание влаги в наполнителе, тем выше прочность модельного состава и чистота поверхности получаемых из него моделей.

Для сушки карбамида можно использовать агрегат мод. 62751 (Изготовитель – ГУП "Тираспольский завод литейных машин им. С.М. Кирова", Молдова), также предназначенный для приготовления водорастворимых солевых сплавов на основе карбамида.

Технические параметры и схема агрегата мод. 62751 приведены в табл. 5.34.

Технические параметры агрегата мод. 62751

Параметры	Значения
Производительность, кг/ч	100
Масса порции материала, кг	50
Размер ячейки сита, мм	1,0
Температура сушки, °С	70
Расход сжатого воздуха (при давлении 0,5 МПа), м³/ч	1,0
Установленная мощность, кВт	2,8
Габаритные размеры, мм:	
длина	4440
ширина	2470
высота	4000
Масса, кг	4000

Примечание. Габаритные размеры указаны без электропечи СНОС-Б.7.12/3И1.

**Изготовление тугоплавких модельных составов.** Тугоплавкие модельные составы, как правило, изготавливают в печах с электрическим нагревом с ёмкостью плавильного бака от 0,05 до 0,10 м³. К числу тугоплавких модельных составов относятся, например, составы типа КПсЦ, то есть модельные составы, переходящие из твердого в вязкопластичное состояние при температуре более 100°С.

Как и для изготовления других марок модельных составов, для изготовления модельного состава КПсЦ, прежде всего, готовят навески исходных компонентов. Канифоль сосновую измельчают до кусков размером менее 40 мм, после чего включают вентиляцию, загружают куски канифоли в печь и расплавляют, повышая температуру расплава до 140...160°С. В расплав канифоли вводят церезин синтетический,

предварительно измельченный до кусков с размерами не более 20 мм, и повышают температуру расплава до 200...220°С.

Включив мешалку, перемешивают расплав в тигле печи до полного растворения церезина в канифоли. По окончании растворения церезина в печь порционно вводят полистирол. Растворение полистирола проводят при температуре расплава в пределах от 200 до 220°С и постоянном перемешивании расплава. Длительность растворения полистирола в расплаве при температуре 200...220°С, составляет 2...3 ч.

После окончания растворения полистирола приготовленный модельный состав выдерживают в печи при 200...220°С в течение часа, при отключенной мешалке, для удаления из расплава воздушных пузырьков. Готовый модельный состав разливают в противни.

**Изготовление легкоплавких металлических сплавов.** Легкоплавкие металлические сплавы выплавляют в печи с тиглем из нержавеющей стали. Для выплавки, например, 20 кг сплава Вуда необходимо взвесить 10 кг висмута, 5 кг свинца, 2,5 кг олова и 2,5 кг кадмия.

До начала плавки в тигель помещают немного парафина, с целью защиты расплава от окисления, и навеску висмута. Включают печь и нагревают тигель до полного расплавления висмута. После расплавления висмута в тигель загружают навески свинца, олова и кадмия в указанной последовательности. Расплав выдерживают в тигле до полного растворения введённых в тигель материалов. Проверку расплавления навесок в расплаве и перемешивание расплава проводят с помощью стального прута.

По окончании расплавления-растворения навесок расплав выливают в воду.

С целью удаления следов парафина с поверхности слитков проводят промывку слитков сплава, используя бензол или эфир. Гранулирование сплава проводят путём его выливания по каплям в холодную воду.

## 5.5. Контроль качества модельных составов

Из числа свойств модельных составов, приведенных в разделе 5.1, в цехах, производящих литьё по выплавляемым моделям, при проведении входного и текущего контроля, как правило, контролируют: предел прочности при статическом изгибе, массовую долю золы, свободную линейную усадку, теплоустойчивость, температуру каплепадения или плавления, содержание воды и воздуха в используемом модельном составе.

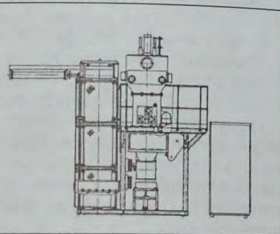
**Свободная линейная усадка ( $\alpha_{\text{л}}$ ).** Для определения величины свободной линейной усадки из испытуемого модельного состава изготавливают образцы путём запрессовки пастообразного модельного состава в стальную или алюминиевую пресс-форму. Как правило, образец имеет форму бруса квадратного сечения с размерами 6×6×150 мм или 10×10×180 мм.

Температура пресс-формы в момент запрессовки модельного состава, должна быть в пределах 26...28°С. Модельный состав, в момент запрессовки должен находиться в том состоянии и запрессовываться при той температуре и давлении, при которых его запрессовывают в пресс-формы, используемые для получения моделей отливок текущего производства.

После запрессовки образцы выдерживают в пресс-форме в течение 2...5 мин, извлекают из пресс-формы и охлаждают на воздухе при температуре 18...20°С в течение не менее 7 часов. Для испытаний изготавливают не менее трёх образцов. Замер длины охлаждённых образцов проводят с помощью штангенциркуля с точностью измерения не более 0,05 мм.

Расчёт величины свободной линейной усадки проводят по формуле (%):

Таблица 5.34





$$\alpha_M = 100 \cdot \frac{l_n - l_{об}}{l_n} \quad (5.6)$$

где  $l_n$  – размер (длина) рабочей полости пресс-формы, мм;  $l_{об}$  – длина образца после его охлаждения, мм.

При этом разница показаний значений свободной линейной усадки между образцами, вычисленных по формуле (5.6), не должна превышать 0,1%.

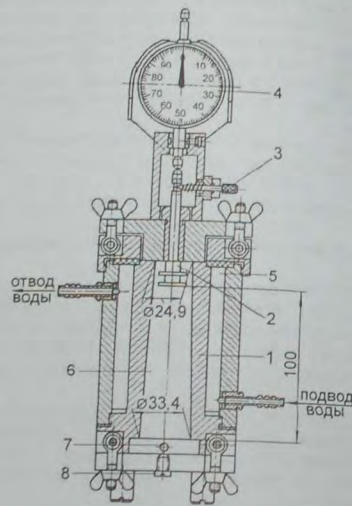
Согласно методике, разработанной в НИИТАвтопроме, свободную линейную усадку определяют на приборе, схема которого представлена на рис. 5.5. Прибор представляет собой водоохлаждаемую пресс-форму, рабочая полость которой оформлена гильзой 1. В верхней части пресс-формы установлен индикатор часового типа 4.

Перед запрессовкой испытуемого модельного состава в пресс-форму подвижный стержень датчика выводят в крайнее верхнее положение и фиксируют защелкой 3. Поворотом циферблата датчика его стрелку устанавливают на ноль. При этом нижняя часть подвижного стержня 2 располагается в верхней части полости гильзы 6.

Запрессовку модельного состава в пресс-форму осуществляют через отверстие 7, когда пресс-форма находится в горизонтальном положении. Охлаждение образца испытуемого модельного состава в пресс-форме осуществляется посредством проточной воды, движущейся в полости 5 рубашки охлаждения пресс-формы. Цифрой 8 на рис. 5.5 указано место установки термометра, который вводится в отверстие вместо винта после запрессовки в пресс-форму модельного состава.

Непосредственно после запрессовки модельного состава в пресс-форму датчик индикатора часового типа расфиксируют, а пресс-форму из горизонтального положения переводят в вертикальное и включают её водное охлаждение. Температура охлаждающей воды на входе в охлаждающую рубашку прибора должна иметь температуру 18...20°C. Охлаждение образца в пресс-форме осуществляют до тех пор, пока стрелка индикатора не будет показывать в течение 30 мин одну и ту же величину. При длине образца 100 мм показания индикатора будут соответствовать величине свободной линейной усадке модельного состава. То есть, например, при показаниях индикатора 0,6 мм значение свободной линейной усадки составит соответственно 0,6%.

Рис. 5.5. Прибор для определения свободной линейной усадки модельных составов



Для испытаний модельного состава на приборе конструкции НИИТАвтопрома изготавливают не менее двух образцов. При этом результаты измерений их усадки не должны различаться более чем на 0,08%.

Величина свободной линейной усадки модельных составов зависит от достаточно большого числа факторов и параметров, в число которых входят: форма и размеры образца, место подвода модельного состава в образец, начальная температура пресс-формы, чистота поверхности рабочих поверхностей пресс-формы и т.п.

Для определения средней величины свободной линейной усадки модельного состава можно использовать ступенчатый образец, схема которого представлена на рис. 5.6 а [233].

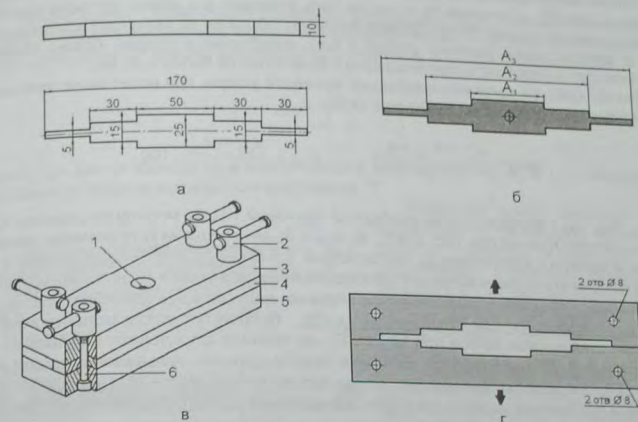


Рис. 5.6. Образец для определения средней величины свободной линейной усадки модельного состава (а), схема обмера образца (б), общий вид пресс-формы (в) и схема разреза вставок пресс-формы (г): 1 – запрессовочное отверстие; 2 – зажимы пресс-формы; 3 – верхняя плита пресс-формы; 4 – вставки пресс-формы; 5 – нижняя плита пресс-формы; 6 – направляюще-зажимной болт

При изготовлении образца запрессовку модельного состава в пресс-форму осуществляют через литник 1 (см. рис. 5.6,в) диаметром 8 мм. Место подвода модельного состава в образец, на рис. 5.6,б отмечено окружностью. Температура пресс-формы в момент запрессовки в неё модельного состава должна находиться в пределах от 26 до 29°C.

Для определения средней величины свободной линейной усадки модельного состава запрессовывают не менее 3-х образцов с периодичностью 10...11 мин между запрессовками при длительности охлаждения образца в пресс-форме в течение 5...6 мин.

Запрессовку испытуемого модельного состава в пресс-форму рекомендуется проводить при следующих параметрах: