

две и более пластины со щелевыми каналами специального профиля, устанавливаемые одна над другой, как, например, это представлено на рис. 10.5.

Вариантом использования керамических стержней или алундовых трубок 2 (см. рис. 10.6,а) является их укладывание друг на друга "накрест" в два и более рядов между параллельноком 3. При этом расстояние между параллельно уложенными трубками выдерживают в пределах 0,2...0,4 мм.

Другим вариантом выполнения сетчатого фильтра щелевого типа является изготовление в модели стояка отверстий, в которые до начала нанесения огнеупорного покрытия на модельный блок вводят керамические стержни или алундовые трубки 2 в один (см. рис. 10.6,б) и более рядов. После нанесения огнеупорного покрытия и выплавления модельного состава стержни (трубки) окажутся в полости стояка 1.

В некоторых случаях щелевой фильтр выполняют в каком-либо элементе ЛПС (коллекторе, литниковом ходе, стояке) путём предварительного выполнения в данном элементе литниковой системы сквозных отверстий. В качестве примера на рис. 10.6,в представлена модель коллектора с заранее выполненными в ней сквозными отверстиями 3. Щелевой фильтр данной конструкции формируется в результате нанесения огнеупорного покрытия на модельный блок. То есть после нанесения на модельный блок огнеупорного покрытия и выплавления из КО модельного состава в коллекторе КО остаются стержни, являющиеся частью тела самой КО. При заливке такой КО (см. рис. 10.6,в) расплав проходит по стояку 1 через щели, образованные телом КО в коллекторе 3, из которого попадает в литниковые ходы (питатели) 2.

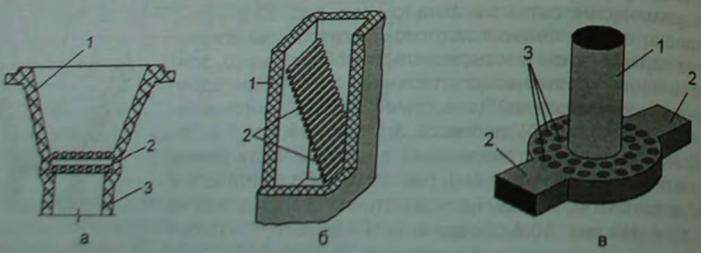


Рис. 10.6. Схемы щелевых фильтров

Экструдированные фильтры (например, фильтры, производимые фирмой Corning) изготавливают путём экструзии пластифицированной керамической массы

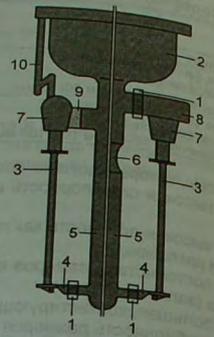


Рис. 10.4. Схема установки фильтров в модельном блоке

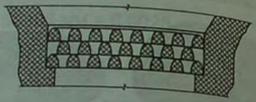


Рис. 10.5. Схема установки в КО фильтра лабиринтного типа

через специальную фильеру, с последующим высокотемпературным спеканием полученной заготовки. В результате спекания "сырая" керамическая масса фильтра приобретает необходимую прочность и огнеупорность. Схемы поперечных сечений фильтров, получаемых методом экструзии, представлены на рис. 10.7.

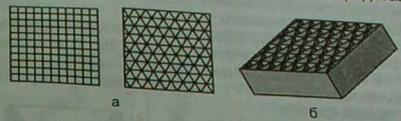


Рис. 10.7. Схемы поперечных сечений (а) и общий вид (б) экструдированных фильтров

Помимо керамических сеток, для очистки расплавов легкоплавких цветных сплавов используют металлические сетки с мелкой ячейкой. Для фильтрационного рафинирования медных сплавов используют металлические сетки из вольфрама, молибдена, ванадия, для алюминиевых сплавов – сетки из

титановой, никелевой или стальной проволоки.

**Тканые фильтры.** Основой тканых фильтров является огнеупорная ткань, например, кремнезёмистая ткань КС-11-ЛА (ТУ РБ 05780349.006-98) или ткани из углеродных или высокоглинозёмистых материалов (см. рис. 10.8). При выборе материала тканого фильтра для использования в литье по выплавляемым моделям, прежде всего, необходимо исходить из следующих положений: 1) основа материала фильтра не должна растворяться в фильтруемом расплаве; 2) основа материала фильтра должна быть химически инертной по отношению к фильтруемому расплаву; 3) температура плавления основы материала фильтра должна быть более высокой, чем температура заливки фильтруемого расплава; 4) материал фильтра должен быть устойчив к окислению при температуре прокаливания КО.

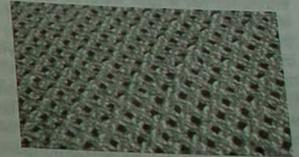


Рис. 10.8. Кремнезёмистая ткань

Тканые фильтры используют для фильтрационной очистки чугуна, стали, магниевых сплавов на основе железа, алюминиевых сплавов, жаропрочных никелевых сплавов, сплавов на основе меди и пр. При этом тканые фильтры используют как для получения отливок, так и для получения мерных шихтовых заготовок (сплитков).

В частности, использование тканого фильтра КС-11-ЛА-2,0-А (маркировка ткани: КС – кремнезёмная сетка; 11 – условный состав стекла, из которого выполнена ткань; ЛА – тип переплетения нитей ткани – "ложный ажур"; А – аппретированный термоупрочняющим составом, эмульсией, полиниацетатом) для фильтрационного рафинирования позволило авторам [260] повысить жидкотекучесть, плотность и электропроводность меди марок М2 и М3, а также плотность и жидкотекучесть латуней марок Л63, Л68 и ЛС 59-1. При этом содержание Н.В. в меди снизилось в 1,4...1,65 раза, а в латунях – в 1,5...1,8 раза. Авторы отмечают, что наибольшей скоростью фильтрации обладают фильтровальные ткани с трикотажным переплетением, наименьшей – с прямым переплетением.

Авторы работ [267; 268] использовали тканые фильтры КС-11-ЛА в технологии вакуумной термофильтрационной обработки жаропрочных сплавов типа ЭП, ЖС и ВЖЛ как для получения отливок, так и мерных шихтовых заготовок из отходов проката и ЛПС отливок данных сплавов.

Непосредственное использование отходов (проката, ЛПС отливок) жаропрочных сплавов в качестве шихты для изготовления литых деталей методом вакуумно-

го переплава не представляется возможным в связи со значительной неоднородностью их химического состава, структуры и механических свойств. Для устранения указанных недостатков Е.А. Сошников с сотрудниками разработал технологию получения жаропрочных никелевых сплавов из возврата и отходов сплавов из механических цехов, сочетающий вакуумную термовременную (ТВО) и фильтрационную обработку расплавов жаропрочных никелевых сплавов.

Согласно разработанной технологии ТВО расплава жаропрочного никелевого сплава заключалась в его перегреве в условиях вакуума на 200...250°C и изотермической выдержке в течение 5...15 мин, с последующим понижением температуры расплава до технологической и выпуском расплава из печи в изложницу, над которой установлен четырёхслойный тканый фильтр.

В этом случае ТВО приводит к гомогенизации расплава по химическому составу, оставляя расплав неравномерным по Н.В. С целью удаления Н.В. (окисных плёнок, весных по Н.В. С целью удаления Н.В. (окисных плёнок, нитридов, карбонитридов и т.п.), а также для усиления эффекта гомогенизации, расплав профильтровывали через тканый фильтр.

Данную технологию использовали как для изготовления мерных шихтовых заготовок жаропрочных никелевых сплавов, так и для изготовления отливок. Для получения мерных шихтовых заготовок (см. рис. 10.9) использовали на стальную изложницу (изложницы) 5, установленную на стальную плиту 6. На изложницу устанавливали металлоприёмник 4, футерованный огнеупорной смесью 2, приёмник 4, футерованный огнеупорной смесью 2, приотвернутой на основе хромитопериклаза. К верхней части металлоприёмника 4 с провисанием крепили четырёхслойный тканый фильтр 1 (КС-11-ЛА). Для закрепления тканого фильтра 1 на металлоприёмнике 4 использовали отожжённую стальную проволоку 3.

Во избежание приваривания крупных слитков (масса слитка более 30 кг), стальную изложницу и плиту перед использованием помещали на 10...20 мин в электрическую печь сопротивления с окислительной атмосферой и температурой 950...1000°C. После извлечения из печи изложницу и плиту охлаждали на воздухе до комнатной температуры. В результате выполнения данной технологической операции стенки изложницы и плиты покрывались тонким слоем окислы, которая, собственно, и являлась защитным покрытием, предотвращающим приваривание слитка к изложнице и плите.

Футерованный металлоприёмник, до установки в него четырёхслойного тканого фильтра, прокачивали в течение 5...6 ч при температуре 950...1050°C. В момент заливки температура металлоприёмной чаши (металлоприёмника), изложницы и плиты составляла от 25 до 40°C.

Исследования качества сплавов мерных заготовок жаропрочных никелевых сплавов, полученных в установке ИСВ-0,16 данным способом, показали, что в структуре металла отсутствуют окисные плёнки, скопления нитридов и карбонитридов, Н.В. засорного типа, а механические свойства металла в мерных шихтовых заготовках ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0.2}$ ,  $\delta$ , КСУ,  $\epsilon$ ) соответствуют нормам на прокат или литой сплав, указанным в соответствующих ОСТе.

Кроме того, значения показателей механических свойств сплавов в литых деталях, полученных из этих заготовок, превышают значения аналогичных показателей механических свойств сплавов в деталях, полученных с использованием отходов проката или ЛПС отливок:  $\sigma_B$  и  $\sigma_{0.2}$  — на 15%,  $\delta$  — на 20...30%,  $\epsilon$  — на 20%, КСУ — на

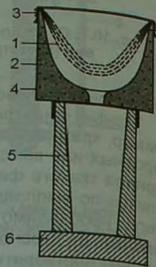


Рис. 10.9. Схема изложницы с металлоприёмником для получения мерной шихтовой заготовки

75...100%. Металлографические исследования качества отливок показали, что в отливках из сплавов типа ЭП, ВЖЛ и ЖС-ЗДК, изготовленных из шихтовых заготовок, прошедших ТВО и фильтрационную очистку, карбиды приобрели форму, близкую к глобулярной, и располагались не по границам кристаллов в виде сплошных прослоек (плёнок), а равномерно компактно как внутри кристаллов, так и на их границах. При этом усадочные и поверхностные дефекты (по результатам цветной дефектоскопии) в отливках практически отсутствовали.

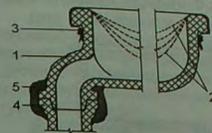


Рис. 10.10. Схема установки тканого фильтра в ЛЧ

Для реализации процесса фильтрационного рафинирования жаропрочного никелевого сплава непосредственно в литейной форме КО выполняли сборку, что схематично представлено на рис. 10.10. Сборку электрокорундовой КО проводят после её предварительного прокалывания и охлаждения до комнатной температуры. После охлаждения в верхней части ЛЧ 1 (см. рис. 10.10) с "глубоки" провисанием крепят ткань КС-11-ЛА (в четыре слоя). Для фиксации ткани 2 на ЛЧ используют предварительно отожжённую проволоку 3 из нержавеющей стали.

После закрепления ткани ЛЧ устанавливают и самовтердеющей пастообразной огнеупорной смеси 5, приготовленной на основе смеси КО формируют в опорный наполнитель, нагревают до 950...980°C и заливают металлом в вакуумной плавильно-заливочной установке.

Оценка степени очистки различных сплавов ткаными фильтрами показывает её обратно пропорциональную зависимость от температуры фильтра и температура выпуска металла из печи, тем выше степень очистки металла. При этом установлено, что для получения качественных отливок из никелевых сплавов типа ЭП, ЖС или ВЖЛ температура фильтра должна быть не менее 400...500°C, а температура сплава при заливке должна быть не менее 1460...1480°C.

При литье алюминиевых сплавов тканые фильтры используют преимущественно при получении отливок со стенками толщиной менее 1,5 мм с целью предупреждения образования спаев и недоливов в этих стенках. В качестве примера на рис. 10.11 представлена схема установки тканого фильтра 4 в КО 1, предназначенной для получения алюминиевой отливки "Турбина" 5. Согласно рис. 10.11 однослойный тканый фильтр 4 (стеклоткань) закрепляют медной или отожжённой стальной проволокой 3 на торце тонкостенной стальной трубки-лейки 2. Трубку-лейку изготавливают из жести и используют для быстрого создания металлостатического напора над фильтром, достаточного для прохождения расплава алюминия через фильтр. Поверхность трубки-лейки перед закреплением фильтра покрывают тонким слоем огнеупорной глины и просушивают при 400...500°C. Подготовленную для заливки трубку-лейку с фильтром помещают в прокалённую КО, непосредственно перед заливкой формы и заливают расплавом. Непосредственно после заливки формы трубку-лейку извлекают из формы, а оставшийся в ней расплав сливают в сток формы или плавильную печь.

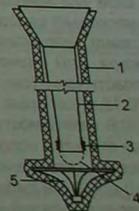


Рис. 10.11. Схема установки тканого фильтра и трубки-лейки в КО

Для проведения фильтрационной сетки с размером ячеек 1×1 мм или двухслойную стальную сетку с размером ячеек 1,5×1,5 мм, что позволяет снизить содержание Н.В. в магниевых сплавах в 3...9 раз. В некоторых случаях вместо стальной сетки используют тканую сетку, изготовленную из графитовых волокон.

**Зернистые фильтры.** Зернистые фильтры используют для фильтрационной очистки расплавок как при получении отливок, так и для получения мерной шихтовой заготовки. Схемы некоторых конструкций зернистых фильтров, выполненных в КО, представлены на рис. 10.12.

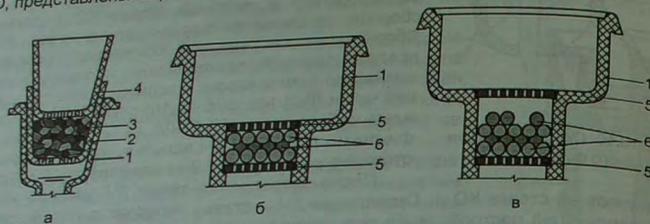


Рис. 10.12. Схемы выполнения зернистых фильтров: 1 – КО; 2 – нижний стакан; 3 – колотые кусочки огнеупорного материала; 4 – верхний стакан; 5 – керамическая пластина; 6 – сферические зёрна огнеупорного материала

Фильтрующей основой зернистых фильтров являются крупные зёрна сферической или неправильной (колотой) формы из огнеупорного материала, уложенные в несколько рядов между керамическими стаканами (см. рис. 10.12,а) или керамическими пластинами, имеющими технологические отверстия или щели меньшего размера, чем размеры зёрен. При этом зёрна, например, могут быть плотно зажаты пластинами (см. рис. 10.12,б) или находиться в "свободном" состоянии (см. рис. 10.12,в) насыпью.

В зависимости от температуры и природы заливаемого сплава, в качестве зёрен фильтра используют колотые зёрна периклазового, хромитопериклазового, диоксида или шамотной кирпичики, конверторного шлака с размерами в поперечнике от 3 до 12 мм либо изготавливают шарики из электрокорунда, сплавов хлористых и фтористых солей и т.п. Зёрна для фильтров изготавливают различными способами. Колотые зёрна, например, изготавливают путём дробления соответствующих огнеупорных изделий в щёковой камнедробилке с последующим отсевом требуемых фракций и промывкой выделенных зёрен в проточной воде. Сферические гранулы диаметром 9...10 мм, используемые для фильтрационной очистки жаропрочных никелевых сплавов, изготавливают, например, путём окатывания капель ГРЭС в чашечном грануляторе, в порошкообразном электрокорунде или периклазе, с последующим плакированием гранул концентратом оксида иттрия, провяливанием на воздухе и сушкой в течение 1...2 ч при 400°C.

Эффективность рафинирования расплава через зернистый фильтр зависит от краевого угла смачивания материала фильтра фильтруемым расплавом. По данным А.В. Курдюмова, применение активных материалов, смачиваемых фильтруемым расплавом, позволяет в 2...4 раза повысить эффективность фильтрационного рафинирования и в 1,5...2 раза увеличить диаметр используемых зёрен по сравнению с фильтрами из несмачиваемых материалов.

В работе [190] для изготовления фильтра использовали керамические стаканы с отверстиями в днище. Схема выполнения такого фильтра представлена на рис. 10.12,а. Исследования качества сталей 35Л и 45Л показали, что использование в качестве фильтрующего элемента крошки периклазового или диоксида кирпичика, позволяет снизить содержание серы в сталях на 0,15% и количество Н.В. на 18...25%. При этом величина показателя относительного удлинения сталей повышается на 20...37%, а ударная вязкость увеличивается на 15...18% при неизменной величине предела прочности на разрыв.

Для фильтрационного рафинирования алюминиевых сплавов весьма эффективна фильтрационная очистка с использованием шамотной или периклазовой фильтрационной рафинирования алюминиевых сплавов в качестве зернистого материала используют крошку флюсов различного состава с относительно высокой температурой плавления.

Для проведения фильтрационного рафинирования магниевых сплавов используют мелкие кусочки кокса, графита, боя периклазовых огнеупорных изделий. Из числа медных сплавов алюминиевые бронзы относятся к числу сплавов, наиболее насыщенных растворёнными газами и загрязнённых Н.В. Поэтому рафинирование алюминиевых бронз – операция обязательная, способствующая повышению не только механических свойств сплава, но и качества отливки.

По данным [224], наилучшие результаты по рафинированию алюминиевой бронзы даёт продувка её расплава инертным газом в печи через пенокерамический насадок и последующая фильтрация расплава через зернистый (кусковой) фильтр, установленный в ЛЧ формы. Осуществление фильтрационной очистки расплава золь в нём содержание газов. При этом эффективность фильтрационной очистки зависит от материала используемого фильтра.

Эффективность фильтрационного рафинирования (относительное количество растворённых газов, удалённых из металла в результате фильтрационной очистки) можно оценить по формуле (%):

$$f_{ог} = \frac{100 \cdot (C_{ог} - C_r)}{C_{ог}}, \quad (10.5)$$

где  $f_{ог}$  – относительное понижение содержания газа или Н.В. в сплаве после проведения фильтрационного рафинирования, %;  $C_{ог}$  и  $C_r$  – содержание в сплаве газов или Н.В. до и после фильтрационного рафинирования соответственно.

В табл. 10.2 приведено содержание газов в образцах алюминиевой бронзы до и после фильтрации в зависимости от материала фильтра, а также величина  $f_{ог}$ , рассчитанная по формуле (10.5) с использованием табличных данных.

Таблица 10.2

**Содержание газов в алюминиевой бронзе до и после фильтрации, в зависимости от материала фильтра**

Материал фильтра	Содержание газов в алюминиевой бронзе до / после фильтрации, см <sup>3</sup> /100 г. и (f <sub>ог</sub> )	
	БрАЖНМц	БрАМцДЖ
Фарфоровый бой	3,9 / 2,54 (34,8%)	4,3 / 2,7 (37,2%)
Плавиловый шпат	3,73 / 2,49 (33,2%)	4,55 / 3,23 (29,1%)
Периклаз	3,50 / 3,25 (7,1%)	3,6 / 3,4 (5,6%)

Данные, приведенные в табл. 10.2, свидетельствуют о том, что в исследованных условиях наиболее эффективна очистка бронзы путём её фильтрации через фарфоровый бой и плавиковый шлат. Авторы работы [224] отмечают, что в результате фильтрационной очистки повышается пластичность бронзы, без изменения её прочностных свойств. Кроме того, фильтрационная очистка приводит к значительному укрупнению зерна в отливке не изменяя микроструктуру сплава.

**Пенокерамические фильтры.** Способ получения пенокерамических фильтров (ПКФ) основан на дублировании керамикой высокопористой структуры сетчато-ячеистого полимера – пенополиуретана (ППУ).

Технология изготовления ПКФ состоит в следующем. Для изготовления ПКФ используют эластичный пенополиуретан (например, пенополиуретан в соответствии с ОСТ 6-05-407-75) с сетчато-ячеистой пространственной структурой.

Заготовку для ПКФ необходимых размеров и конфигурации вырезают, например, ножницами из блочного ППУ.

Огнеупорную суспензию, для пропитки ППУ готовят, например, на основе ГРЭС и пылевидного огнеупорного материала-наполнителя, например, белого электрокорунда, периклаза, цирконового концентрата и т.п. С целью обеспечения наиболее плотной укладки частиц пылевидного материала-наполнителя в формирующейся керамической основе ПКФ и снижения усадки ПКФ при спекании используют микропорозиты огнеупорных материалов с частицами округлой формы и определённого granulометрического состава.

Пропитку заготовки ППУ проводят путём её окунания в приготовленную огнеупорную суспензию с последующей деформацией заготовки в огнеупорной суспензии. По окончании пропитки заготовку извлекают из суспензии и слегка отжимают для удаления излишков суспензии и выравнивания её распределения по объёму заготовки. При этом заданную плотность заготовки фильтра обеспечивают степенью её отжатия.

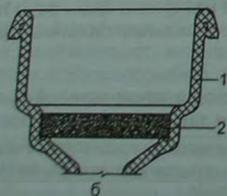
Полученную заготовку сушат в потоке воздуха при температуре 25...40°C и скорости воздуха 0,5...2,0 м/с. В случае необходимости после сушки, на заготовку наносят (без деформации и отжатия) второй слой огнеупорной суспензии и сушат его по вышеуказанному режиму.

После сушки огнеупорного покрытия проводят спекание заготовки. В процессе спекания керамической основы ПКФ из заготовки удаляется её первоначальная структурная составляющая – ППУ, а сам ПКФ приобретает определённые механические свойства.

Спекание ПКФ проводят при температуре 1150...1200°C в течение 2...3-х часов. При этом скорость подъёма температуры в печи до 600°C – не более 100 °C/ч, скорость подъёма температуры в печи более 600°C – не ограничена. Охлаждение ПКФ с печью осуществляют до температуры 450...500°C. В результате проведенных операций получают ПКФ с сетчато-ячеистой структурой и относительной пористостью 0,8...0,95 (см. рис. 10.13, а).



а



б

Рис. 10.13. Вид пенокерамического фильтра (а) и схема его установки в ЛО под ЛЖ (б)

Как и зернистые фильтры (см. рис. 10.13, б), ПКФ 2 устанавливают в ЛО 1 после удаления из неё модельного состава перед прокаливанием ЛО в верхней части стояка под ЛЧ.

Пенокерамические фильтры производят централизованно, специализированными предприятиями, в частности, фирмами Drache Umwelttechnik (Германия) и др.

Фирма Drache Umwelttechnik производит пенокерамические фильтры для фильтрационной очистки алюминиевых сплавов, сталей, высокопрочных и ковких рачимических фильтров, производимых фирмой Drache Umwelttechnik, приведены в табл. 10.3.

Марка фильтра	Характеристика
Ceralu®	Фильтры выполнены на основе оксида алюминия и предназначены для фильтрационной очистки алюминия и его сплавов при температуре до 1000°C.
Cerazik®	Фильтры выполнены на основе диоксида циркония и предназначены для фильтрационной очистки сталей при температуре до 1700°C.
Cerasik®	Фильтры выполнены на основе карбида кремния и предназначены для очистки чугунов и цветных металлов при температуре до 1420°C.

Высокая эффективность фильтрационной очистки расплавов с использованием зернистых и пенокерамических фильтров подтверждается практикой их использования [146; 297 и др.]. В частности, использование зернистого фильтра толщиной 45...55 мм или пенокерамического фильтра толщиной 20 мм, установленных под ЛВ, позволило авторам работы [297] сократить трудоёмкость финишной обработки отливок из сплава ВХ-9Л в десятки раз за счёт снижения дефектности отливок и существенно понизить содержание нежелательных примесей и Н.В. в сплав. Об эффективности

Таблица 10.4  
Содержание газов, серы и Н.В. в сплаве ВХ-9Л до и после фильтрации расплава

Примесь	Масса примеси, % (по массе), в сплаве	
	нефильтрованным	фильтрованным
Кислород	0,0028	0,0024
Азот	0,031	0,022
Сера	0,0050	0,0035
Н.В.*	0,032	0,016

Примечание. \* – %, об.

фильтрационной очистки можно судить по данным табл. 10.4, а также рис. 10.14. На рис. 10.14, а представлена зависимость содержания Н.В. в фильтрованном (1) и нефильтрованном (2) сплаве ВХ-9Л от размера Н.В., а на рис. 10.14, б представлены гистограммы, позволяющие оценить влияние фильтрации расплава ВХ-9Л на его механические свойства. На рис. 10.14, б обозначены: 1 – нефильтрованный сплав, 2 – сплав профильтрован через зернистый фильтр, 3 – сплав профильтрован через ПКФ.

Обязательным условием успешной реализации способа фильтрационного рафинирования является правильный выбор типа фильтра, его размеров и места установки. Кроме того, качество фильтрационной очистки расплавов во многом зависит от качества самого фильтра и свойств материала, из которого он выполнен, а также природы материала покрытия поверхности фильтра.

В ряде случаев, с целью усиления степени очистки расплава, поверхность фильтра плакируют различными химически активными материалами, например

окисью иттрия (для сплавов на основе хрома), алюминием кобальта (для жаропрочных никелевых сплавов) и т.п.

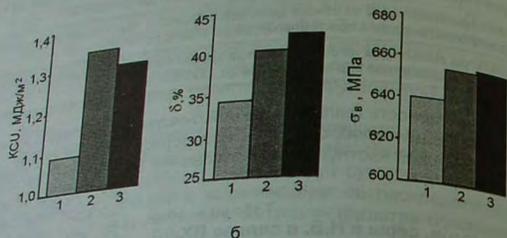
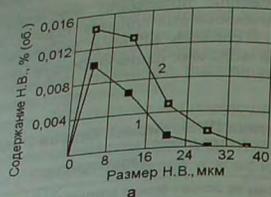


Рис. 10.14. Зависимость содержания Н.В. в сплаве ВХ-9Л от их размера (а) и гистограммы (б) уровня механических свойств нефильтрованного и фильтрованного сплава

Для повышения эффективности работы фильтра, при всех прочих равных условиях, его следует располагать как можно ближе ко входу в питатель отливки. При этом следует обратить внимание на следующие моменты.

1. Использование фильтра КО, во избежание образования недолива, поступающего в литниковую систему КО, не должно снижать удельный расход расплава, поставленная задача решается повышением металлостатического напора над фильтром; увеличением площади фильтра; уменьшением толщины фильтра; применением фильтра с большей величиной гидравлического радиуса отверстий; повышением перегрева заливаемого расплава и пр.

2. Поскольку температура фильтра, как правило, ниже температуры кристаллизации фильтруемого расплава, то, во избежание преждевременного затвердевания расплава в каналах фильтра, при назначении температуры заливки следует учитывать потерю температуры расплавом при его движении в каналах фильтра в начальный период заливки.

3. При всех прочих равных условиях, более эффективны те фильтры, поверхность которых смачивается фильтруемым расплавом.

Кроме того, при использовании того или иного фильтра всегда следует учитывать особенности его использования и установки в КО (форму), а также предусматривать способ удаления остатков фильтра из металла ЛПС залитых отливок для последующего использования возврата (ЛПС) в составе шихты.

## Глава 11. ЗАЛИВКА ФОРМ. ЗАТВЕРДЕВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ ОТЛИВОК

К моменту окончания подготовки форм к заливке (к окончанию прокаливанию) завершают и процесс плавки сплава. При этом к моменту заливки температура металла при его выпуске из печи в ковш и КО (формы), как правило, соответствуют значениям, приведенным в табл. 11.1 [62, 153, 291 и др.].

Температура сплава и КО (формы) к моменту заливки  
Таблица 11.1

Заливаемый сплав	Температура металла при выпуске из печи в ковш, °С	t <sub>з</sub> , °С
Сталь конструкционная нелегированная (отливки любых габаритов)	1580-1630	800-950
Сталь конструкционная нелегированная (мелкие отливки)	1580-1630	300-950
Сталь конструкционная низколегированная	1560-1620	800-950
Сталь хромоникелевая высоколегированная	1560-1610	900-980
Магнитотвердые сплавы	1570-1620	450-550
Чугун серый	1250-1430	800-1050
Чугун высокопрочный	1360-1410	800-950
Чугун антифрикционный	1320-1360	20-50
Бронза БрА9Ж4	1120-1140	600-700
Бронза БрО8Ц4	1060-1080	450-500
Бронза БрК3Мц1	1080-1100	600-650
Латунь ЛС 59-1	950-980	550-650
Латунь ЛК 80-3	940-960	150-250
Сплавы алюминиевые	650-720	20-250
Сплавы алюминиевые (для отливок с повышенным классом чистоты поверхности)	650-720	400-500
Сплавы магниевые	680-740	100-350

В литье по выплавляемым моделям заливку металла в формы осуществляют как из ковша, так и непосредственно из тигля плавильной печи. При получении отливок методом направленной кристаллизации в некоторых плавильно-заливочных установках заполнение формы расплавом происходит после расплавления мерной шихтовой заготовки, предварительно установленной непосредственно в литниковой чаше КО, либо в результате расплавления шихтовой заготовки сплава в условиях проведения её бестигельной плавки за пределами формы.

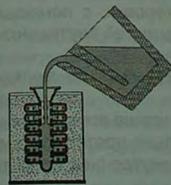


Рис. 11.1. Схема заливки формы из ковша

Подавляющее большинство отливок в цехах литья по выплавляемым моделям получают путём заливки расплава в форму на воздухе из футерованного (см. рис. 11.1) или нефутерованного ручного ковша.

Футерованные ручные ковши используют для заливки сплавов на основе железа, никеля, меди, кобальта и т.п. (см. рис. 11.2). Перед использованием все футерованные ковши проходят определённую подготовку, заключающуюся в футеровке ковша и его прокаливании.

В зависимости от типа разливаемого сплава, футеровку ковшей изготавливают из огнеупорных материалов с кислотными, амфотерными или основными свойствами.

В частности, для кислой футеровки ковша используют смеси следующих составов (% по массе): песок кварцевый – 72, глина огнеупорная – 20, вода – 8 или пе-

сок кварцевый — 76, кварц пылевидный — 10, глина огнеупорная — 12, кислота борная — 2, вода (сверх 100%) — 8.  
 Футеровку ковша из материалов с основными свойствами готовят из смеси следующего состава (% по массе): хромитопериклаз — 92, глина огнеупорная — 6, кислота борная — 2, стекло жидкое периклаз и глину огнеупорную просеивают через сито с ячейкой 1 мм. Приготовление смеси для футеровки ковшей осуществляют в механическом лопастном смесителе либо следующим образом (см. рис. 11.2,б).

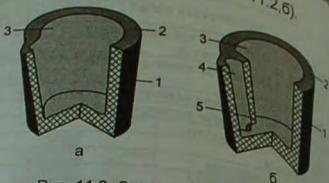


Рис. 11.2. Схемы ручных ковшей:  
 1 — кожу; 2 — футеровка; 3 — приёмная ёмкость ковша; 4 — сифон; 5 — область наиболее плотной набивки футеровочной смеси

Футеруют ковши чайникового типа следующим образом (см. рис. 11.2,б).  
 1. На дно стального кошуа предварительно очищенного от шла, предварительно футеровки, насыщают остатков прежней футеровочной смеси пять слоёв футеровочной смеси толщиной 40...55 мм и тщательно утрамбовывают ручной трамбовкой.

2. После набивки первого слоя на его поверхность насыпать очередную слой футеровочной смеси и продолжать набивку до тех пор, пока на дне кошуа не образуется утрамбованный слой толщиной около 50 мм.

3. На поверхность утрамбованного слоя установить металлические шаблоны приёмной ёмкости и сифона, после чего, порционно добавляя новые количества футеровочной смеси, продолжить послойную набивку смеси вокруг шаблонов (толщина каждого слоя — около 50 мм), предварительно взрыхляя поверхность очередного утрамбованного слоя смеси на глубину ~5 мм. Футеровку, в области перехода приёмной ёмкости ковша в сифон необходимо набивать наиболее тщательно и плотно. Стенки кошуа футеровать заоднолицо с верхним торцом кошуа.

4. По окончании набивки футеровки, проводя разнонаправленное лёгкое постукивание молотком по шаблонам, отделить их от утрамбованной смеси и извлечь из полости футеровки кошуа.

5. "Заовалить" (закруглить) все внешние острые углы футеровки, с помощью гладилки загладить торец стенки футеровки и, при необходимости, её внутреннюю поверхность.

6. Верхнюю (торцевую) поверхность футеровки кошуа слегка смочить жидким натриевым стеклом, предварительно разбавленным водой.

7. По окончании набивки и извлечения шаблонов футеровку кошуа провалить на воздухе в течение не менее 24 ч. После проваливания тщательно протереть доступные поверхности футеровки кошуа рукавицей и продуть его внутренние полости сжатым воздухом.

Перед использованием кошуа прокалывают. Кошуа металлоёмкостью (по стали) до 80 кг непосредственно перед использованием прокалывают в электропечи камерного типа или на газовой горелке при температуре 950...980°C в течение не менее 2-х часов.

Кошуа металлоёмкостью (по стали) более 80 кг непосредственно перед использованием прокалывают на газовой горелке при температуре 750...980°C в течение не менее 2...3-х часов. Одним ковшом рекомендуется разливать не более 8...10 плавков стали, если масса одной плавки составляет 160 кг.

Во время заливки не допускается прерывание струи заливаемого в форму металла. При этом струя, истекающая в ЛВ (ЛЧ), должна быть "короткой" (протяжённость струи не должна превышать 100...150 мм) и равномерной в течение всего периода заливки формы.

Ковши без футеровки (ковш выполнен из стального листа толщиной 3 мм), в основном, используют для разлики расплава магния и сплавов на его основе. Пекрасна в тигле с расплавленным флюсом В12, для чего ковш нагревают дощью щипалки удаляют остаток флюса. После этого со стенок кошуа с помощью флюса.

Для наполнения кошуа расплавом донной частью кошуа или щипалкой опускают ковш в расплав, заполняют его жидким расплавом. При извлечении кошуа из расплава часть расплава через носок кошуа сливают обратно в ковш перед заливкой форм некоторое время выдерживают над поверхностью расплава в тигле для стекания флюса с внешних поверхностей расплава и кошуа. Наполненный расплавом ковш проводят заливку форм. Следует отметить, что, во избежание попадания расплава в полость кошуа при зачёрпывании расплава из печи, не следует вычерпывать более 2/3 исходного объёма расплава, находящегося в тигле.

При заливке форм магнелиевым расплавом необходимо обеспечить минимальное расстояние между носком кошуа и ЛВ. При этом струя расплава, заполняющая ковш, должна быть непрерывной и равномерной, а ЛВ должна быть во избежание возгорания магнелиевого расплава во время заливки, струю раскислоты (соотношение 1:1, по массе) из специального распылителя или мешочка из неплотной ткани.

Объём расплава, набранного в ковш, должен быть таким, чтобы по окончании заливки, во избежание попадания флюса в форму, в ковш оставалось не менее 10...15% расплава от его первоначального количества в ковш. Остатки расплава в ковш сливают в изложницу.

## 11.1. Заливка форм

Как было отмечено выше, основная задача процесса заливки формы, как технологической операции, состоит в обеспечении полного заполнения рабочих полостей формы расплавом за определённое время и с определённой температурой. Исходя из этого, с учётом принятой схемы заливки, для каждой конкретной отливки назначают температуру выпуска расплава из печи и, если в ЛПС отсутствуют элементы, регулирующие удельную скорость поступления расплава в форму, продолжительность заливки формы. Если заливка формы осуществляется непосредственно из печи, скорость наклона которой контролируется микропроцессором по определённой программе, назначают удельную скорость выпуска расплава из печи.

При этом продолжительность заливки формы должна быть "согласована" с температурой выпуска металла из печи, которая, в свою очередь, должна быть минимальна, во избежание чрезмерного угара легирующих элементов и насыщения расплава газами, химического взаимодействия расплава с формой и т.п.

При использовании кошуа и КО (форм), у которых начальная температура меньше температуры заливаемого в них расплава, минимально допустимую температуру выпуска металла из печи рассчитывают по формуле:

$$t_{\text{печь}} = t_{\text{л}} + \Delta t_{\text{пер}}, \quad (11.1)$$

$$\Delta t_{\text{пер}} = \Delta t_{\text{л}} + \Delta t_{\text{т}} + \Delta t_{\text{т}} + \Delta t_{\text{ск}} + \Delta t_{\text{к}} + \Delta t_{\text{в}},$$

где  $t_{\text{л}}$  — температура ликвидуса сплава, °C;  $\Delta t_{\text{пер}}$  — величина температуры перегрева расплава в печи над температурой ликвидуса, °C;  $\Delta t_{\text{л}}$  — величина снижения температуры потока расплава при его течения по рабочим каналам КО, °C;  $\Delta t_{\text{т}}$  — минимально допустимый перегрев расплава, поступающего в рабочую полость КО (формы), над температурой ликвидуса, обеспечивающий достаточную жидкотекучесть расплава для полного заполнения рабочих полостей КО, °C;  $\Delta t_{\text{т}}$  — величина снижения температуры потока расплава при его течения по каналам ЛПС, °C;  $\Delta t_{\text{ск}}$  — величина снижения температуры при переливе расплава из ковша в КО (форму);  $\Delta t_{\text{к}}$  — величина снижения температуры расплава при его поступлении и выдержке в ковше, °C;  $\Delta t_{\text{в}}$  — величина снижения температуры расплава при его переливе из тигля плавильной печи в ковш, °C.

Минимально допустимую температуру выпуска металла из печи при непосредственной заливке расплава из тигля печи в КО (форму), имеющую начальную температуру меньшую, чем температура заливаемого расплава, рассчитывают по формуле:

$$t_{\text{печь}} = t_{\text{л}} + \Delta t_{\text{пер}},$$

$$\Delta t_{\text{пер}} = \Delta t_{\text{л}} + \Delta t_{\text{т}} + \Delta t_{\text{т}} + \Delta t_{\text{в}}, \quad (11.2)$$

где  $\Delta t_{\text{пер}}$  — величина температуры перегрева расплава в печи над температурой ликвидуса, °C;  $\Delta t_{\text{в}}$  — величина снижения температуры расплава при его переливе из тигля плавильной печи в КО (форму), °C.

Минимально допустимую температуру выпуска металла из печи при использовании ковша с начальной температурой, равной температуре выпуска расплава из печи и КО (форм), имеющих начальную температуру более низкую, чем температура заливаемого в них расплава, рассчитывают по формуле:

$$t_{\text{печь}} = t_{\text{л}} + \Delta t_{\text{пер}},$$

$$\Delta t_{\text{пер}} = \Delta t_{\text{л}} + \Delta t_{\text{т}} + \Delta t_{\text{ск}}. \quad (11.3)$$

Минимально допустимую температуру выпуска металла из печи при непосредственной заливке расплава из тигля печи в КО (форму) с начальной температурой, равной температуре заливаемого расплава, либо при использовании для этого ковша с начальной температурой, равной температуре выпуска расплава из печи, рассчитывают по формуле:

$$t_{\text{печь}} = t_{\text{л}} + \Delta t_{\text{т}}. \quad (11.4)$$

Как показывают измерения, при использовании ковша и КО (форм) с начальной температурой, более низкой чем температура выпуска расплава из печи, наибольшие потери температуры расплава происходят в ковше и при течении расплава по рабочим каналам КО (форме). При этом величина  $\Delta t_{\text{л}}$  может достигать 20°С и более, величина  $\Delta t_{\text{т}}$ , как правило, составляет 5...10°С, величина  $\Delta t_{\text{ск}} + \Delta t_{\text{в}}$  и  $\Delta t_{\text{в}}$ , как правило, не превышает 1...3°С, а величина  $\Delta t_{\text{ск}}$  изменяется от 0 до 80°С.

То есть из числа рассмотренных параметров наиболее значимыми при получении отливок "традиционным" способом литья по выплавляемым моделям являются величины  $\Delta t_{\text{л}}$  и  $\Delta t_{\text{ск}}$ .

**Охлаждение расплава при его течения в форме (определение величины  $\Delta t_{\text{л}}$ ).** Течение расплава в каналах КО (формы), имеющей начальную температуру более низкую, чем температура расплава, сопровождается понижением температуры как в литниковых каналах, так и в рабочей полости КО (формы). Величина понижения температуры потока расплава тем больше, чем ниже удельная скорость заливки, меньше толщина стенки отливки, больше протяженность отливки, ниже начальная температура и выше теплоаккумулирующая способность КО (формы) и т.п.

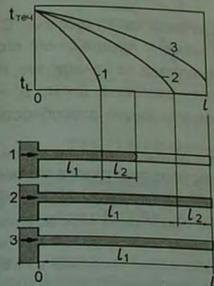
В процессе заполнения канала формы расплавом можно выделить два условия понижения температуры головной части потока расплава от температуры  $t_{\text{л}}$  до температуры  $t_{\text{в}}$ . В этот период времени поток расплава от входа в канал проходит расстояние  $l_1$ . Второй период течения характеризуется появлением и непрезультатом увеличением относительной доли твердой фазы в потоке расплава, в результате чего (при достижении определенной доли твердой фазы в головной части ва на стенках канала) происходит остановку движения расплава в канале формы. При этом за время второго периода заполнения поток расплава успеваеет заполнить участок канала в форме протяженностью  $l_2$ .

В зависимости от расстояния, пройденного расплавом в канале формы длиной  $l$  в первый и во второй периоды заполнения, можно выделить три типа заполнения формы расплавом (см. рис. 11.3):

- тип 1, если  $l_1 + l_2 < l$  (на рис. 11.3 зависимость  $t=f(l)$  обозначена номером 1);
- тип 2, если  $l_1 + l_2 \geq l$  (на рис. 11.3 зависимость  $t=f(l)$  обозначена номером 2);
- тип 3, если  $l_1 \geq l$  (на рис. 11.3 зависимость  $t=f(l)$  обозначена номером 3).

Течение расплава в форме по первому типу заполнения сопряжено с образованием в отливке недоливов. Течение расплава в форме по второму типу заполнения сопряжено с определенной вероятностью образования в отливке спаев, появления на поверхности отливок окисных плёнок, волнистости и т.п. Течение расплава в форме по третьему типу заполнения обеспечивает получение отливки с четкими контурами и гранями, без поверхностных дефектов, обусловленных недостаточной жидкотекучестью расплава.

Рис. 11.3. Распределение температуры вдоль потока расплава, в момент прекращения течения расплава в канале формы



Исходя из вышеизложенного, температуру выпуска металла из печи назначают, прежде всего, исходя из необходимости обеспечения полного заполнения рабочих полостей формы расплавом, температура которого к окончанию заполнения рабочей полости КО (формы) была бы несколько выше температуры ликвидуса заливаемого сплава.

В настоящее время существует значительный "арсенал" методов, позволяющих с той или иной степенью точности и достоверности моделировать процесс запол-

нения расплавом полостей отливки (гидроматрирование, математическое моделирование с использованием конечно-разностных схем или аналитических методов расчёта и т.п.) и рассчитывать величину минимально допустимого перегрева расплава при его течении по каналам формы. Тем не менее, наиболее показателен расчёт и информативным, по мнению автора, остаётся аналитический метод расчёта, позволяющий оценить характер и степень влияния того или иного параметра на заполнение формы металлом.

Используя аналитический метод расчёта не представляется возможным смоделировать все огромное разнообразие условий течения расплава по каналам реальных КО (форм). Поэтому для оценки влияния основных параметров процесса течения расплава в форме на величину её заполняемости расплавом предложено наиболее простым случаем — одномерным течением расплава в плоском щелевом канале формы.

В этом случае для расчёта величины минимально допустимого перегрева расплава ( $\Delta t$ ), обеспечивающего полное заполнение плоского щелевого перегрева расчёта ( $\Delta t$ ), обеспечивающего полное заполнение плоского щелевого канала формы протяжённостью  $l$  при течи расплава в нём со скоростью  $W$ , воспользуемся формулой, полученной А.И. Вейником для неметаллической полубесконечной формы:

$$\frac{t_{TEY} - t_{TEY}^1}{t_{TEY} - t_2} = \frac{b_2}{\sqrt{\pi} \cdot c_1^* \cdot \rho_1^* \cdot R} \cdot \sqrt{\frac{l}{W}} \quad (11.5)$$

где  $t_{TEY}$  — температура расплава на входе в плоский щелевой канал формы, °С;  $t_{TEY}^1$  — температура головной части потока расплава в момент прекращения его движения по каналу в форме, °С;  $W$  — скорость течения расплава по каналу, м/с;  $R$  — половина ширины канала, м;  $c_1^*$  — удельная теплоёмкость расплава, Дж/кг;  $\rho_1^*$  — плотность расплава, кг/м<sup>3</sup>;  $b_2$  — коэффициент теплоаккумулирующей способности материала формы при температуре  $t_2$ , Вт·с<sup>0.5</sup>/(м<sup>2</sup>·°С).

Как было отмечено выше, в реальных условиях литья с целью преодоления силы поверхностного натяжения на свободной поверхности потока расплава в форме (для обеспечения заполнения в отливке острых углов и тонких кромок) величина  $t_{TEY}^1$  должна быть выше температуры ликвидус сплава на  $\Delta t_L = 5 \dots 10$  °С. То есть:

$$t_{TEY}^1 = t_L + \Delta t_L \quad (11.6)$$

Используя уравнения (11.5) и (11.6), после некоторых преобразований, определяем величину минимально допустимого перегрева расплава ( $\Delta t_H$ ) на входе в плоскую щелевую полость формы (°С):

$$\Delta t_H = \frac{b_2 \cdot (t_L - t_2) \cdot \sqrt{\frac{l}{W}} + c_1^* \cdot \rho_1^* \cdot R \cdot \Delta t_L \cdot \sqrt{\pi}}{c_1^* \cdot \rho_1^* \cdot R \cdot \sqrt{\pi} - b_2 \cdot \sqrt{\frac{l}{W}}} \quad (11.7)$$

Анализ уравнения (11.7) показывает, что, при всех прочих равных условиях, с увеличением начальной температуры КО, уменьшением теплоаккумулирующей способности материала КО, повышением скорости заливки, а также повышением

толщины стенки отливки и уменьшением её протяжённости, величина минимально допустимого перегрева расплава при заливке может быть понижена.

Используя вышеприведенные данные, несложно в первом приближении расчёт плоских форм могут быть отнесены к плоским. В частности, к числу термилки отливки представляет собой полой цилиндр и длине менее 0,1, либо если стенка отменена 0,1.

**Охлаждение расплава в ковше (определение величины  $\Delta t_{CK}$ ).** Характер понижения температуры расплава в футерованном и нефутерованном ковше различен. После заполнения расплавом футерованного ковша, имеющего начальную температуру меньшую, чем температура футерованного ковша, имеющего начальную температуру расплава в ковше резко понижается и во время заливки 30...60 с вует зависимости 1 на рис. 11.4, а, при повторном наполнении (в пределах одной плавки) — зависимости 2.

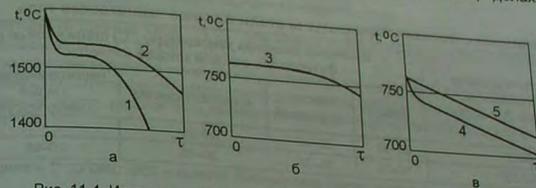


Рис. 11.4. Изменение температуры расплава при его выдержке в ковше

Резкое понижение температуры расплава при его переливе в ковш обусловлено теплоотдачей от расплава к футеровке ковша. При этом начальное понижение температуры расплава в ковше тем меньше, а длительность "стояния" температуры тем больше, чем выше начальная температура ковша, больше его металлоёмкость и наполненность расплавом, а также чем ниже коэффициент теплоаккумулирующей способности материала футеровки ковша.

Вторичное наполнение ковша расплавом также приводит к некоторому понижению температуры залитого в ковш расплава 2 (см. рис. 11.4, а). Однако величина этого снижения температуры несколько меньше, чем при первом наполнении, а объясняется определённым повышением температуры футеровки ковша после его первичного наполнения расплавом (в рассматриваемом случае понятие "стояния" температуры предполагает временной период, характеризующийся крайне низкой скоростью понижения температуры расплава в ковше).

Для большей стабилизации температурного режима заливки КО (форм) желательно, чтобы начальная температура футерованного ковша и температура выпуска металла из печи были одинаковыми. В этом случае понижение температуры расплава в ковше начинается не сразу (см. зависимость 3 на рис. 11.4, б), а спустя некоторое время, достаточное для завершения заливки форм из ковша. На практи-

ке данный вариант подготовки ковша, как правило, применяется для разливки минеральных сплавов.

В ковшах без футеровки выпуска расплава из печи, понижение температуры расплава во времени в начальный период практически происходит по линейному закону. Аналогичным образом, но с небольшим и резким понижением температуры происходит понижение температуры расплава и в ковше без футеровки, имеющей начальную температуру более низкую, чем температура расплава при выпуске из печи (см. зависимость 4 на рис. 11.4, в).

В любом случае выдержку расплава в ковше следует сократить до минимума во избежание недопустимого понижения температуры расплава в ковше, значительного насыщения расплава газами из атмосферы и его окисления. Помимо этого, необходимо минимизировать время нахождения расплава в ковше, следовательно, длительностью сохранения модифицирующего воздействия на расплава использованных в плавке модификаторов.

Для проведения расчётов температуры выпуска стали из печи в табл. 11.2 приведены усреднённые величины снижения температуры стали в ковшах чайникового типа через 1...3 мин после начала наполнения их расплавом [261].

Таблица 11.2  
Величина снижения температуры стали в ковше чайникового типа

Масса стали в ковше / металлоёмкость ковша (по стали), кг	Величина снижения температуры (°С) стали в ковше с футеровкой, основой которой является:			
	шамот	песок кварцевый	хромитопериклаз	периклазохромит, белый электрокорунд
60/80*	20-35	30-45	50-70	-
130/150**	15-35	25-35	30-45	-
				70-95

Примечание. \* - температура ковша перед наполнением сталью - 950...980°С; \*\* - температура ковша перед наполнением сталью - 720...750°С.

При повторном наполнении ковша расплавом (в пределах одной плавки) величина снижения температуры стали в ковше на 5...15°С меньше значений, приведенных в табл. 11.2.

В стальных нефутерованных ковшах понижение температуры расплава происходит непрерывно, с момента их извлечения из расплава. Для магниевых сплавов температуру расплава в ковше металлоёмкостью от 10 до 22 кг, по магнию (ковшовой температурой от 720 до 800°С), по прошествии времени  $\tau$  с момента извлечения ковша из расплава, автор рекомендует рассчитывать по эмпирическому уравнению:

$$t_k = 0,375 \cdot (t_{\text{вып}} - 0,6 \cdot \tau) \cdot \sqrt[3]{G}, \quad (11.8)$$

где  $t_k$  и  $t_{\text{вып}}$  - температура расплава в ковше через время  $\tau$  и температура расплава в печи соответственно, °С;  $\tau$  - длительность нахождения расплава в ковше, с;  $G$  - металлоёмкость ковша, кг.

Используя вышеприведенные данные, несложно, в первом приближении, рассчитать температуру расплава при его выпуске из печи ( $t_{\text{печь}}$ ) - один из наиболее важных технологических параметров.

**Пример 11.1.** Рассчитать температуру выпуска расплава стали 30Л из печи для получения отливки пластинчатой формы протяжённостью  $L=0,2$  м и толщиной  $2R=0,004$  м, если КО заливают из ковша чайникового типа металлоёмкостью 80 кг (по стали), футерованного смесью из кварцевого песка и имеющего температуру в момент наполнения ковша на основе кварцевого песка и имеющего температуру  $t_2=950^\circ\text{C}$ , кажущаяся плотность материала КО -  $\rho_2=1880 \text{ кг/м}^3$ , КО выплывает на основе кварцевого песка, кварца пылевидного и ГРЭС. Скорость подъёма для проведения расчётов допустим, что удельная теплоёмкость расплава стали -  $c_1=880 \text{ Дж/кг}$ , плотность расплава -  $\rho_1=6950 \text{ кг/м}^3$ , температура ликвидуса стали -  $t_L=1490^\circ\text{C}$ . Помимо этого, примем, что  $\Delta t_1=5^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t_{\text{ок}}+\Delta t_{\text{б}}=2^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t_2=5^\circ\text{C}$ .

**Расчёт.** Температуру расплава при выпуске из печи рассчитываем по формуле:

$$t_{\text{печь}} = t_L + \Delta t_{\text{пер}}$$

Согласно уравнению (11.1) величина перегрева расплава над температурой ликвидус составляет:

$$\Delta t_{\text{пер}} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_{\text{ок}} + \Delta t_{\text{б}} + \Delta t_{\text{б}}$$

Используя данные табл. 11.2, для ковша с вышеприведенными параметрами принимаем величину  $\Delta t_{\text{ок}}=30...45^\circ\text{C}$ .

Рассчитаем величину минимально-допустимого перегрева расплава ( $\Delta t_1$ ), обеспечивающего качественное заполнение расплавом рабочей полости КО. Для расчёта, прежде всего, рассчитаем величину теплоаккумулирующей способности материала КО:

$$b_2 = \sqrt{\rho_2 \cdot c_2 \cdot \lambda_2}$$

Для определения величины коэффициента теплопроводности материала КО воспользуемся формулой (6.34):

$$n = 0,52 - 0,09 \cdot \left( \frac{t_2 - 500}{670} \right)^3 = 0,52 - 0,09 \cdot \left( \frac{950 - 500}{670} \right)^3 = 0,493;$$

$$A = 0,71 + 0,49 \cdot \sqrt{0,002 \cdot t_2 - 1} = 0,71 + 0,49 \cdot \sqrt{0,002 \cdot 950 - 1} = 1,17;$$

$$\lambda_2 = A \cdot (0,001 \cdot \rho_2 - 1,3)^n = 1,17 \cdot (0,001 \cdot 1880 - 1,3)^{0,493} = 0,894 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}.$$

Удельную теплоёмкость материала КО рассчитываем по уравнению (6.35):

$$c_2 = 0,298 \cdot \rho_2 \cdot \left( \frac{t_2}{700} \right)^{0,1} = 0,298 \cdot 1880 \cdot \left( \frac{950}{700} \right)^{0,1} = 577,6 \text{ Дж/(кг}^\circ\text{C)}.$$

Используя полученные значения, рассчитываем величину  $b_2$ :

$$b_2 = \sqrt{\rho_2 \cdot c_2 \cdot \lambda_2} = \sqrt{1880 \cdot 577,6 \cdot 0,894} = 985 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0,5}/(\text{м}^\circ\text{C)}.$$

Рассчитав значение  $b_2$ , по формуле (11.7) рассчитываем величину  $\Delta t_{п}$ :

$$\Delta t_{п} = \frac{b_2 \cdot (t_1 - t_2) \cdot \sqrt{\frac{L}{W} + c_1^1 \cdot \rho_1^1 \cdot R \cdot \Delta T \cdot \sqrt{\pi}}}{c_1^1 \cdot \rho_1^1 \cdot R \cdot \sqrt{\pi} - b_2 \cdot \sqrt{\frac{L}{W}}} =$$

$$= \frac{985 \cdot (1495 - 950) \cdot \sqrt{\frac{0,2}{0,035}} + 880 \cdot 6950 \cdot 0,002 \cdot 5 \cdot \sqrt{3,14}}{880 \cdot 6950 \cdot 0,002 \cdot \sqrt{3,14} - 985 \cdot \sqrt{\frac{0,2}{0,035}}} = 72^\circ\text{C}$$

После определения значения величины  $\Delta t_{п}$ , рассчитываем величину перегрева расплава при выпуске из печи:

$$\Delta t_{п\text{ер}} = \Delta t_{п} + \Delta t_{\text{Т}} + \Delta t_{\text{Г}} + \Delta t_{\text{СК}} + \Delta t_{\text{К}} + \Delta t_{\text{В}} = 72 + 5 + 5 + 2 + (30 \dots 45) = (114 \dots 129)^\circ\text{C}$$

Исходя из результатов, полученных выше, температура выпуска расплава из печи в ковш составит:

$$t_{\text{печь}} = t_{\text{К}} + \Delta t_{п\text{ер}} = 1495 + (114 \dots 129) = 1609 \dots 1624^\circ\text{C}$$

Принимаем:  $t_{\text{печь}} = 1610 \dots 1625^\circ\text{C}$ .

**Прочие способы заливки форм.** Заполнение форм и затвердевание металла отливок под металлостатическим и атмосферным давлением не всегда позволяет получать отливки с требуемым уровнем прочностных свойств, герметичностью и качественной поверхностью. Поэтому, помимо заполнения КО (форм) расплавом под действием металлостатического давления, создаваемого в стояке, в литье по выплавляемым моделям используют и другие способы заливки, позволяющие решать вышеописанные проблемы.

С целью повышения плотности и механических свойств металла отливок их кристаллизацию проводят в условиях повышенного газового давления на расплавы [257; 299 и др.], в частности применяя способ литья с противодействием. Схема устройства для реализации данного способа заливки КО сплавом АЛ9 представлена на рис. 11.5, а [299].

Согласно рис. 11.5, а устройство включает в себя КО 2, закреплённую ЛВ вниз и установленную в специальной опоке, имеющей в днище коническую горловину 1. В днище опоки также выполнено отверстие для подвода расплава в КО из тигля по металлопроводу 4. Верхняя часть опоки закрывается крышкой 3. Днище опоки и металлопровод разделены сменной асбестовой прокладкой 5 и стальной фильтрующей сеткой 6. Опока с КО и металлопровод прижаты к плите 7 через асбестовую прокладку 8.

В свою очередь, для обеспечения прижима опоки к фланцу металлопровода и крышки к сыпучему наполнителю на подвижной плите машины смонтировано специальное загрузочное устройство, состоящее из опорной плиты 9, прижимной плиты 10, шести пружин 11 и 12. Перемещение прижимной плиты, в зависимости от высоты опоки, осуществляется по четырём направляющим 13.

Для заполнения КО расплавом в камере 15, повышают газовое давление, в результате чего расплав из тигля по металлопроводу 4 поступает в КО и заполняет её рабочую полость. Спустя некоторое время камера 11 понижает до атмосферного. В результате этого расплава, давление в плав из стояка и металлопровода стекает обратно в тигель.

Основными технологическими параметрами, предопределяющими получение качественных отливок данным способом, являются: начальная температура КО, высота подъёма уровня расплава в КО и давление воздуха в камере устройства.

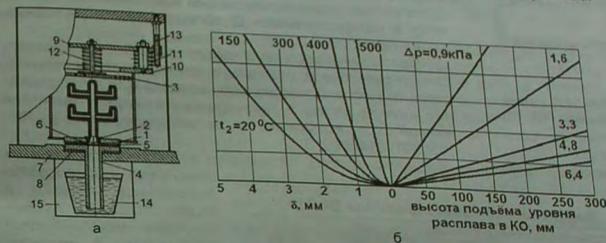


Рис. 11.5. Схема установки получения отливок методом противодействия расплава (а) и номограмма для определения основных параметров заливки алюминиевого расплава в КО (б)

На рис. 11.5, б представлена номограмма, позволяющая оптимизировать соотношение основных технологических параметров процесса получения отливок из алюминиевых сплавов способом противодействия [299]. На номограмме обозначены:  $\delta$  – толщина стенки отливки,  $t_2$  – начальная температура КО,  $\Delta p$  – давление газа в камере.

Согласно данным [299] реализация вышеописанной схемы заливки при начальной температуре КО около  $500^\circ\text{C}$ , позволяет получать качественные отливки из алюминиевых сплавов с толщиной стенки до  $0,5$  мм, а повышение температуры расплава до  $900^\circ\text{C}$  обеспечивает получение отливок из алюминиевых сплавов с величиной пористости по баллу I, с высокой герметичностью и гидропрочностью.

При получении отливок из алюминиевых сплавов также реализуют способ заливки КО расплавом под низким давлением. Для этого предварительно прокалённые при  $850 \dots 900^\circ\text{C}$  КО охлаждают до  $770 \dots 790^\circ\text{C}$  и заливают расплавом под низким давлением  $0,025 \dots 0,03$  МПа. После заливки КО, в период кристаллизации расплава, давление повышают до  $0,03 \dots 0,04$  МПа.

По данным авторов [133], по сравнению с заливкой и кристаллизацией металла в обычных условиях, использование данного способа позволяет повысить плотность металла отливок из сплава АК7ч (АЛ9) на  $2 \dots 4\%$ , улучшить его физико-механические свойства и снизить брак по негерметичности отливок более чем в пять раз.

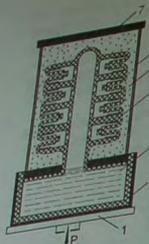


Рис. 11.6. Схема способа ЛВМ-КД

Для изготовления алюминиевых тонкостенных отливок сложной конфигурации с заданной гидро- и конструктивной прочностью используют способ литья по выплавляемым моделям с кристаллизацией под давлением (ЛВМ-КД) [314].

Принцип способа ЛВМ-КД поясним на схеме, представленной на рис. 11.6. Для заливки предварительно прокалённую КО формируют в контейнер 6 с опорным наполнителем 5. Контейнер 6 закрепляют на верхнем неподвижном столе 7, расположенным над металлоприёмником 2, после чего жидкий металл 3 из плавильной печи заливает в металлоприёмник 2, облицованный огнеупорным материалом.

При заливке расплав 3 поступает в КО 4 через отверстие в пуансоне в результате движения вверх нижнего стола 1. После затвердевания металла в КО при движении нижнего стола 1 вниз происходит отрыв литника и 132; 301; 314; 315; 316].

Отливки, полученные данным способом, отличаются от отливок, полученных традиционным способом, повышенной пневмо- и гидроплотностью, повышенными механическими свойствами. В качестве примера в табл. 11.3 приведены результаты сравнительных испытаний механических свойств сплава ВАЛ10, определённых

Таблица 11.3

**Механические свойства сплава ВАЛ10**

Способ изготовления отливки	σ <sub>т</sub> , МПа	δ, %
Шихтовая заготовка	226 / 380	16 / 22
ЛВМ*	205 / 310	7 / 8
ЛВМ-КД	220 / 390	10 / 8
ЛВМ в графитовые формы	206 / 340	12 / 19
ЛВМ-КД в графитовые формы	237 / 414	18 / 20

Примечание. \* ЛВМ – литьё по выплавляемым моделям.

на образцах, вырезанных из шихтовой заготовки, а также образцах, полученных различными способами литья. В числителе (см. табл. 11.3) показатели сплава в литом состоянии, в знаменателе – после его термической обработки по режиму Т5.

К числу способов заливки, повышающих качество отливки, относится способ вакуумного всасывания расплава в рабочую полость КО (формы). В качестве примера на рис. 11.7,а представлена схема устройства, предназначенного для изготовления отливок из алюминиевых сплавов данным способом [286].

Сущность способа вакуумного всасывания состоит в том (см. рис. 11.7,а), что расплав 7 попадает в рабочую полость предварительно прокалённой КО 1 в результате создания в ней определённого разрежения (понижения газового давления во внутренней полости КО).

Для заливки КО устанавливают заливочным отверстием вниз в опоку 2 и вакуум-камеру 6, засыпают сухим зернистым опорным наполнителем 4 и герметизируют. После герметизации собранное устройство опускают в тигель 8 с жидким алюминиевым

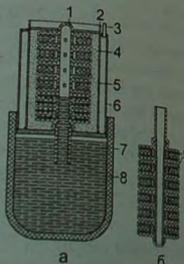


Рис. 11.7. Схема способа вакуумного всасывания расплава в КО (а) и разрез заливкой КО (б)

сплавом с таким расчётом, чтобы открытый торец литникового хода (со стороны ЛВ) погружился в расплав.

Создавая разрежение в вакуум-камере через патрубков 3, расплав из тигля поднимается по литниковому ходу и стожку КО, заполняя её рабочие полости. После заполнения расплавом рабочих (формообразующих) полостей КО и КО 1 механически разрушают. В результате разрушения зумпфа незатвердевший к этому моменту расплав сливается из стожка в тигель 8.

По окончании слива жидкого остатка из литникового хода отключают источник создания разрежения и залитую КО извлекают из вакуум-камеры. В результате, в КО остаются залитыми металлом её рабочие полости и частично – стожок, что схематично представлено на рис. 11.7,б.

Использование данного способа заливки позволило авторам [286] получить фасонные отливки из сплава АК7ч (АЛ9) без окисных плёнок и значительного количества Н.В. при хорошем качестве поверхности и выходе годного до 0,90...0,95. Для реализации вышеописанного способа в промышленных условиях в настоящее время производятся соответствующие установки. В частности, установка вакуумного всасывания конструкции ООО "Спецлиттех" (г. Москва, Россия) предназначена для получения сложных тонкостенных отливок из алюминиевых сплавов методом вакуумного всасывания в гипсовые, песчаные, керамические и металлические формы. Технические параметры и схема установки приведены в табл. 11.4.

Таблица 11.4

**Технические параметры и схема установки вакуумного всасывания**

Параметры	Значения	
Размеры гипсовой формы, мм: диаметр×высота	170×100	
Производительность, отливок/ч	17–31	
Тип привода	Пневматический, электрический	
Режим работы	Полуавтоматический, наладочный	
Установленная мощность, Вт	2,0	
Габаритные размеры, мм: длина×ширина×высота	2073×2935×2620	
Масса, кг	1080	

Для получения отливок из высокопрочного чугуна способом вакуумного всасывания авторы работы [164] использовали устройство, схема которого представлена на рис. 11.8.

Согласно схеме, представленной рис. 11.8, в корпус 9 вакуумной камеры на корпус керамического металлопровода 3 устанавливают предварительно прокалённую и нагретую до 150...200°C КО 1. Пространство между корпусом камеры и КО засыпают сухим опорным наполнителем 2. На керамический металлопровод 3 надевают металлическую трубу 10 и покрывают её внешней поверхностью огнеупорной обмазкой 4. Сверху на поверхность сыпучего опорного наполнителя в камере укладывают асбестовый лист. Камеру 9 закрывают крышкой 7, которая оснащена резиновой прокладкой 11. Для создания разрежения в камере крышка оснащена патрубком 8.

Для заливки КО металлопровод камерой погружают в расплав чугуна 5, находящийся в тигле 6, и создают в камере разрежение. Давление разрежения, ресивере, используемом для создания разрежения, составляет 450 мм. рт. ст., длительность выдержки КО под разрежением — 30 с.

Установлено, что отливки, полученные способом вакуумного всасывания, по сравнению с отливками, полученными в песчано-глинистые формы и по технологии "традиционного" способа литья по выплавляемым моделям, имеют более высокую износостойкость (на 30% и 15% соответственно), в отливках значительно уменьшены графитовые включения, увеличилось (до 95...100%) количество перлита, повысилась плотность металла отливок.

Для получения отливок из титановых сплавов заливку КО расплавом и его кристаллизацию проводят под повышенным давлением, создаваемым не только центробежной силой, но и силой электромагнитной. С целью создания электромагнитной силы используют кондукционные магнитодинамические насосы (МГД-насосы) постоянного тока, что схематично представлено на рис. 11.9. На рис. 11.9 обозначены: 1 — литниковочувствительная форма; 2 — стояк; 3 — расплав; 4 — многослойная обмотка.

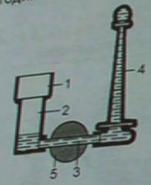


Рис. 11.9. Схема заливки обложечной формы с использованием МГД-насоса

$$P = \frac{B \cdot (I - q_1 \cdot \frac{B \cdot Q}{h})}{h \cdot R_H} \quad (11.9)$$

где  $B$  — индукция магнитного поля;  $I$  — сила тока в канале;  $q_1$  — динамическая шунтирующая проводимость;  $Q$  — расход расплава в канале;  $h$  — толщина канала,  $R_H$  — статический параметр (в зависимости от конструкции насоса,  $R_H = 0,6...0,9$ ).

По окончании заполнения формы расплавом давление в форме повышается. Расчёт величины давления в этот период времени проводят по формуле (11.9) приняв величину  $Q=0$ :

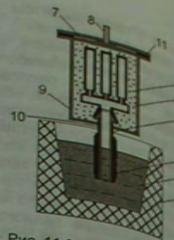


Рис. 11.8. Схема получения отливки из чугуна, способом вакуумного всасывания расплава в КО

Согласно рис. 11.9 для заполнения рабочих полостей ОГ (КО) расплавом МГД-насос располагают поперечным образом, чтобы его канал являлся частью литниковой системы отливки. В процессе заливки расплав заполняет канал насоса, где полагает в пересечение магнитного и электрического полей. Пропуская через расплав электрический ток, в металле создают объемную электромагнитную силу, которая, в свою очередь, и обеспечивает направленное движение расплава по литниковым каналам формы, а также избыточное давление расплава в форме в процессе всего времени кристаллизации в талла отливки, рассчитываемое по формуле [25]:

$$p = \frac{B \cdot I}{h \cdot R_H} \quad (11.10)$$

Поскольку канал насоса является элементом литниковой системы, то во избежание разрыва потока насоса в литниковой системе, необходимо обеспечить та-превышали величины.

$$Q = \mu_s \cdot h \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (11.11)$$

где  $\mu_s$  — коэффициент расхода литниковой системы от ЛЧ до входа в канал насоса;  $b$  — ширина канала насоса;  $g$  — ускорение свободного падения тела;  $H$  — высота металлостатического напора расплава в стояке.

В случае использования МГД-насоса заполнение формы расплавом проводят при давлении 0,01...0,05 МПа, что по сравнению с заливкой в условиях гравитации обеспечивает большую (в 2...2,5 раза) скорость течения расплава в форме. По не более 1,2...1,5 МПа/с с целью улучшения условий питания затвердевающей от-прекращают после полного затвердевания расплава в канале насоса.

Использование данного способа заливки при получении турбинных лопаток из сплава BT-20Л в электрокорундовые КО, позволило авторам работы [24] повысить механические свойства сплава BT-20Л до уровня деформированного титанового 4...5 раз.

Заливку КО с использованием центробежных сил используют при получении отливок из титановых, алюминиевых и медных сплавов, сталей на установках центробежной заливки [227; 289 и др.]. При этом используют установки центробежной заливки, как с вертикальной, так и горизонтальной осью вращения.

Центробежную заливку в установках с горизонтальной осью вращения используют для получения отливок, близких по форме к полым цилиндрам, для чего расплав заливают в КО, изготовленную на основе электрокорунда и предварительно заформованную в самотвердеющий опорный наполнитель [227]. К моменту заливки используемая КО должна быть прокалена и иметь определённую температуру.

Преимуществом данного способа заливки является возможность получения протяжённых цилиндрических отливок без усадочных дефектов. Это обусловлено тем, что в результате действия центробежной силы область усадочной пористости (рыхлот, газоусадочных пор, макропористости) и Н.В. располагается на внутренней поверхности отливки (см. рис. 11.10). То есть, предусматривая на внутренней стенке цилин-

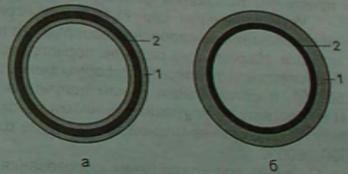


Рис. 11.10. Схема расположения зоны усадочной пористости в поперечном сечении полый цилиндрической отливки, затвердевшей в условиях гравитации (а) и центробежной силы (б): 1 — отливка; 2 — зона усадочной пористости в стенке отливки

дрической отливки определенный припуск на механическую обработку, можно получить бездефектные (по вышеперечисленным дефектам) отливки.  
 Данным способом получают стальные отливки массой до 120 кг при частоте вращения формы до 1400 об/мин.  
 Частоту вращения формы при центробежном литье с горизонтальной осью вращения и соотношении  $\frac{D_B}{D_H} \leq 3$ , где  $D_H$  и  $D_B$  наружный и внутренний диаметр отливки соответственно, рассчитывают по формуле Л.С. Константинова (об/мин):

$$n = \frac{5520}{\sqrt{0,5 \cdot \rho_1 \cdot D_B}} \quad (11.12)$$

где  $\rho_1$  – плотность жидкого металла, г/см<sup>3</sup>,  $D_B$  – наружный диаметр отливки, см.  
 Схема заливочного узла установки с горизонтальной осью вращения представлена на рис. 11.11, где обозначены:

- 1 – заливочный жёлоб, 2 – расплав;
- 3 – КО, 4 – опорный наполнитель.

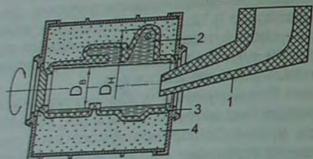


Рис. 11.11. Схема заливочного узла центробежной установки с горизонтальной осью вращения

правления столбчатых кристаллов в теле отливки.

Установлено (см. рис. 11.10,б), что пористая часть центробежно-залитой отливки примыкает к её свободной поверхности и составляет менее 20% толщины стенки отливки. Наименьшие размеры пористой зоны наблюдаются у отливок, полученных при начальной температуре формы менее 200°С и гравитационном коэффициенте 50...55, а оптимальный режим получения отливок с минимальным содержанием Н.В. соответствует гравитационному коэффициенту 70...75 при начальной температуре формы 500...600°С.

С целью предотвращения образования пригара на отливках следует понизить либо начальную температуру КО, либо давление, оказываемое расплавом на поверхность заливочной КО (понизить частоту вращения формы при заливке).

На рис. 11.12 представлена кривая, разграничивающая область давлений и температур, при которых образуется (1) и не образуется (2) пригар на стальных отливках при заливке КО, изготовленных на основе электрокорунда [227].

Другой особенностью центробежного литья с горизонтальной осью вращения является суще-

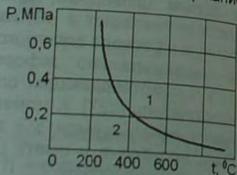


Рис. 11.12. Зависимость давления при центробежном литье от начальной температуры формы, при котором не образуется пригар на поверхности стальных отливок

ственной неравномерность величины усадки отливки в её различных направлениях. Усадка стальной отливки в осевом направлении (вдоль оси вращения формы при заливке) постоянна и находится в пределах от 1,8 до 2,0%. Усадка отливки в радиальном направлении зависит от размеров отливки и частоты вращения формы. Величину усадки стальных отливок в радиальном направлении можно определить, используя номограмму, представленную на рис. 11.13.

Как правило, при получении отливок методом центробежного литья с горизонтальной осью вращения из сплавов с узким интервалом кристаллизации особых трудностей не возникает. Сложнее получить качественную отливку из сплавов с широким интервалом кристаллизации (например, из оловянной бронзы, кремнистой латуни, марганцовистой стали, алюминий-медных сплавов и т.п.).

Сплавы с широким интервалом кристаллизации следует заливать в форму медленно, при повышенной частоте её вращения и невысоком перегреве расплава. При этом для изготовления КО следует использовать материалы с высокой теплоаккумулирующей способностью, а КО перед заливкой нагреть до определённой температуры.

На установках с горизонтальной осью вращения также, получают мелкие фасонные отливки преимущественно из сплавов с широким температурным интервалом кристаллизации. Схема размещения КО при получении мелких фасонных отливок в установке с горизонтальной осью вращения представлена на рис. 11.14, где обозначены: 1 – заливочный жёлоб, 2 – расплав, 3 – КО, 4 – опорный наполнитель, 5 – отливки.

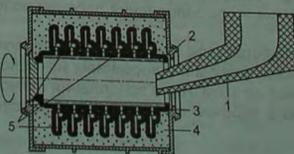


Рис. 11.14. Схема размещения КО при получении мелких фасонных отливок

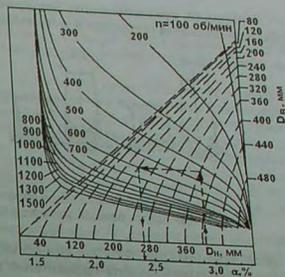


Рис. 11.13. Номограмма для определения усадки стальных отливок в их радиальном направлении при заливке

В процессе заполнения формы расплавом в условиях центробежных сил и вертикальной оси вращения формы выделяют четыре этапа, схематично представленные на рис. 11.15 [290].  
 На первом этапе заполнения при поступлении расплава в стояк вращающейся формы, заливаемый расплав вовлекается во вращательное движение, которое приобретает не только за счёт сил трения о стенки стояка, но и лопастей, выполненных в его донной части.

Благодаря вращательному движению и металлостатическому напору в стояке, расплав из стояка поступает в литниковые ходы.

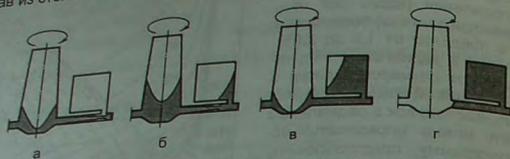


Рис. 11.15. Схемы этапов заполнения рабочей полости формы при центробежной заливке с вертикальной осью вращения

Этот этап (см. рис. 11.15,а, где область нахождения расплава в форме затемнена) предшествует началу поступления расплава в рабочую полость формы и характеризуется нестабильностью движения и загрязненностью головной части потока расплава, движущегося в литниковом ходе. С целью улавливания наиболее загрязненной (головной) части потока в литниковом ходе выполняют достаточно губкой зумпф.

На втором этапе заполнения (см. рис. 11.15,б) увеличивается расход расплава через питатель, характер потока расплава в питателе приобретает стабильность и компактность, в литниковом ходе формируется свободная поверхность и начинается безнапорное заполнение формы расплавом. На этом этапе заполнения скорость продвижения свободной поверхности потока расплава в рабочей полости формы определяется расходом расплава из стояка и может быть рассчитана по формуле [290] (м/с):

$$w_1 = \mu \cdot S_{\text{лп}} \cdot \frac{\sqrt{\omega^2 \cdot r_0^2 + 2 \cdot g \cdot h_1}}{0,5 \cdot S_{\text{лп}} + S_{\text{отл}}}, \quad (11.13)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода ( $\mu=0,5 \dots 0,9$ );  $\omega$  – угловая скорость вращения формы;  $S_{\text{лп}}$  и  $S_{\text{отл}}$  – площадь сечения ливникового отверстия и "живого" сечения отливки, соответственно,  $\text{м}^2$ ;  $r_0$  – текущий радиус, м;  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\text{м/с}^2$ ;  $h_1$  – высота уровня расплава в стояке на первом этапе заполнения рабочей полости формы, м.

Третий этап заполнения рабочей полости формы (см. рис. 11.15,в) сопровождается полным заполнением литникового хода расплавом и понижением металлостатического напора в стояке. Движение расплава на этом этапе заполнения становится напорным, а скорость движения расплава в рабочей полости формы рассчитывается по формуле [290] (м/с):

$$w_2 = \mu \cdot \sqrt{\omega^2 \cdot (l_1 - l_2)^2 - 2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)}, \quad (11.14)$$

где  $l_1$  и  $l_2$  – расстояние от оси вращения формы до свободной поверхности расплава в рабочей полости формы в начале и конце второго этапа заполнения рабочей полости формы соответственно, м;  $h_2$  – высота уровня расплава в стояке к началу третьего этапа заполнения рабочей полости формы, м.

На четвертом этапе заполнения формы (см. рис. 11.15,г) расплав полностью уходит из полости стояка, оставляя на его поверхности тонкую корочку настывши. На этом этапе заполнения формы свободная поверхность расплава перемещается в полости формы.

Направленность вращения формы при её заполнении расплавом (при центробежной заливке формы с вертикальной осью вращения) предопределяет приоритетные положения (ориентации) размещения отливки в пространстве относительно литникового хода. Практика получения отливок из титановых сплавов свидетельствует о том, что при заливке в наиболее благоприятных условиях (для заполнения расплавом) оказываются отливки, ориентированные в направлениях  $-X$ ,  $+Z$  и  $+Y$  (см. рис. 11.16, где направление вращения формы при заливке обозначено стрелкой).



Рис. 11.16. Направления движения расплава в отливке при центробежной заливке формы с вертикальной осью вращения

Заполняемость рабочих полостей формы расплавом зависит не только от ориентации отливки в пространстве относительно направления вращения формы, но и от удельной скорости поступления расплава в форму, удаления отливки от оси вращения, а также частоты вращения формы. При всех прочих равных условиях, заполняемость формы (жидкотекучесть расплава) в наибольшей степени зависит от частоты вращения формы. С увеличением частоты вращения формы её заполняемость расплавом возрастает, о чем свидетельствует зависимость, представленная на рис. 11.17.

К числу факторов, предопределяющих эффективность заполнения формы расплавом при центробежной заливке с вертикальной осью вращения, относится и наличие смещения между вертикальной осью стояка формы и осью вращения стола центробежной установки (наличие эксцентриситета) заполняемости расплавом рабочих полостей такой формы будет различна.

Исследуя влияние эксцентриситета во вращении стояка на величину жидкотекучести четырёх форм, расположенных равноудаленно друг от друга по периметру стояка, О.Н. Магницкий получил следующие значения величин заполнения спиральных проб на жидкотекучесть (для сплава ВТ5Л при смещении оси стояка от оси вращения центробежного стола на 10 мм): проба №1 была заполнена расплавом на 148 мм, проба № 2 – на 228 мм, проба № 3 – на 442 мм, проба № 4 – на 252 мм.

При центробежном литье с вертикальной осью вращения от ориентации отливки в пространстве, направления течения расплава в форме, удаления отливки от оси вращения формы, частоты вращения формы и пр. зависит не только величина заполняемости рабочих полостей формы, но и характер расположения, а также величина усадочной пористости металла отливки. В качестве примера [313] на рис. 11.18 представлены схемы расположения плоских титановых образцов-отливок при

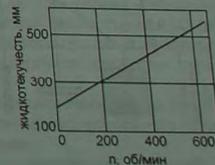


Рис. 11.17. Зависимость жидкотекучести сплава ВТ5Л от частоты вращения формы при заливке [158]

их заливке, на которых указана плотность их металла (в кг/м<sup>3</sup>) – величина, обратная величине пористости металла.

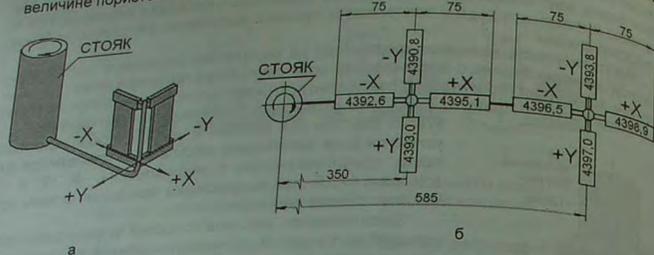


Рис. 11.18. Схема пространственного расположения отливок при заливке (а) и плотность металла в отливках (б)

Авторы [313] отмечают, что в плоских образцах, ориентированных по взаимно перпендикулярным осям и расположенных в 300 мм от оси вращения, газоусадочные раковины при частоте вращения формы  $n=240$  об/мин локализируются в зонах пониженных давлений. При этом по осям  $\pm X$  раковины концентрируются в зонах образцов, а по осям  $\pm Y$  – по всей плоскости образцов. При частоте вращения формы  $n=100$  об/мин данные дефекты рассредоточены по всей плоскости образцов и не зависят от их ориентации в пространстве при заливке. Наибольшую плотность (наименьшую пористость) имеют образцы наиболее удалённые от оси вращения формы и ориентированные при заливке вдоль осей  $+X$  и  $-Y$ .

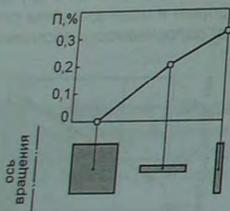


Рис. 11.19. Зависимость пористости образцов от их ориентации относительно оси вращения формы при заливке

вращения либо наклонно.

Следует отметить, что, как и у отливок из других сплавов, величина усадочной пористости отливок из титановых сплавов зависит и от их температурного интервала кристаллизации, и температуры заливки расплава в форму. При этом чем больше интервал кристаллизации сплава и ниже температура заливки сплава в форму, тем выше уровень усадочной пористости, образующийся в отливке в процессе её

затвердевания, о чём свидетельствуют зависимости, представленные на рис. 11.20. На рис. 11.20,б некоторые повышение пористости отливок при увеличении ствия расплава отливки с материалом формы.

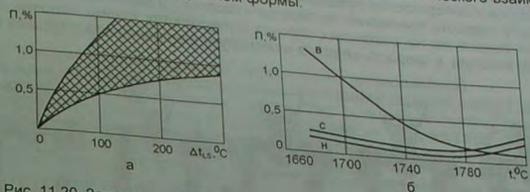


Рис. 11.20. Зависимость пористости титановых сплавов от величины их температурного интервала кристаллизации (а) [158] и температуры заливки формы (б) [290]; в – верхняя часть образца, с – средняя часть образца, н – нижняя часть образца (наиболее удалённая от оси вращения формы при заливке)

## 11.2. Затвердевание отливок

При всех прочих равных условиях, в зависимости от величины начальной температуры КО, течение расплава в полостях КО может носить различный характер.

В условиях получения отливок методом направленной кристаллизации начальная температура КО ( $t_2$ ) равна или больше температуры ликвидуса сплава ( $t_L$ ), в потоке расплава и без снижения его температуры.

В случае, если  $t_2 < t_L$ , то течение расплава в форме сопровождается отводом теплоты его перегрева и определённой доли теплоты кристаллизации с образованием твёрдой фазы в потоке расплава. При этом, в зависимости от величины температурного интервала кристаллизации сплава, толщины стенок отливки, скорости течения расплава в форме, а также теплофизических свойств сплава и материала формы, твёрдая фаза при заливке может образовываться как на стенках КО (пристеночное затвердевание расплава) в виде сплошной корочки, так и непосредственно в потоке расплава в виде разобщённых кристалликов, свободно перемещающихся в потоке расплава.

В качестве примера на рис. 11.21 представлена обобщённая схема основных этапов затвердевания отливки при  $t_2 < t_L$  в условиях последовательного (пристеночного) роста твёрдой фазы в затвердевающем сплаве.

Согласно рис. 11.21, непосредственно после заливки, в форме находится расплав с определённым перегревом над температурой ликвидус (см. рис. 11.21,а).

Поскольку в рассматриваемом случае,  $t_2 < t_L$ , то с момента поступления расплава в форму происходит нагрев формы и, соответственно, охлаждение расплава. Понижение температуры расплава в форме приводит к увеличению его плотности и, соответственно, к уменьшению его объёма. В отливке уменьшение объёма расплава компенсируется поступлением новых порций расплава из прибыли, которая, в свою очередь, получает расплав через литниковые ходы из ЛВ. В результате в ЛВ понижается уровень расплава и начинает формироваться усадочная раковина открытого типа.

Поскольку интенсивность теплоотдачи от расплава в форму, при всех равных условиях, определяется конфигурационными особенностями, толщина её стенок, то величина удельного теплового потока от расплава на различных поверхностях отливки — не одинакова. Соответственно этому номерна и скорость понижения температуры расплава в различных частях формы и время появления на различных рабочих поверхностях формы корочки затвердевшего металла, и скорость её роста в последующее время затвердевания отливки.



Рис. 11.21. Схема последовательности затвердевания отливки: 1 — ЛВ; 2 — жидкий металл (расплав); 3 — литниковый ход; 4 — прибыль; 5 — отливка; 6 — твердый металл; 7 — усадочная раковина открытого типа в ЛВ; 8 — усадочная раковина закрытого типа в прибыли; 9 — рыхлота; 10 — усадочная раковина в отливке

В первую очередь твердая фаза из расплава появляется на поверхности внутренних углов рабочей полости формы, где теплоотвод от расплава в форму наиболее интенсивен (см. рис. 11.21,б). С началом процесса затвердевания расплава (появлением и ростом твердой фазы) в стенки формы передается не только теплота перегрева ещё не затвердевшей части расплава, но и теплота его кристаллизации, а также теплота охлаждающейся затвердевшей части сплава. То есть с этого момента начинается процесс формирования отливки как твердого тела.

Переход сплава из жидкого в твердое состояние реализуется через его двухфазное состояние. Появление двухфазного состояния сплава в затвердевающей отливке сопровождается возникновением и развитием фильтрационного теплопереноса в междендритном пространстве двухфазной области существования сплава (поперечного теплопереноса относительно поперечного сечения стенки отливки) и свободного (продольного вдоль стенки отливки) перемещения расплава вдоль фронтов затвердевающего расплава.

В дальнейшем (см. рис. 11.21,в) толщина и размеры корочки затвердевшего металла и, соответственно, ширина области двухфазного состояния сплава на стенках рабочих поверхностей формы непрерывно увеличиваются. Этот период затвердевания отливки характеризуется тем, что, помимо внутренних углов формы, корочка образуется на стенках формы, оформляющих наиболее тонкие стенки отливки. При этом чем тоньше стенка отливки, тем выше в ней скорость роста твердой корочки и тем выше в ней величина образующейся осевой усадочной пористости. Возникновение усадочной пористости в стенках отливок обусловлено нарушением сплошности продольного потока расплава к междендритным пространствам в двухфазной области отливки, где осуществлялся поперечный теплоперенос расплава.

В первом приближении, при небольшом перегреве залитого в форму расплава зависимость толщины затвердевшей корочки расплава ( $\xi$ ) на плоской стенке форм, зачастую называемый законом "квадратного корня":

$$\xi = k \cdot \sqrt{t},$$

где  $k$  — эмпирический коэффициент (коэффициент затвердевания). В рассматриваемый период времени, образования твердой корочки на поверхностях массивных элементов отливки и ЛПС, а также на поверхностях острых внешних углов рабочей полости формы, практически не происходит. В последнем же от расплава материал объясняется тем, что за время отвода теплоты перегрева-плакумулирующую способность, обусловленную конфигурацией этих элементов рабочей полости формы, практически прогревается до температуры расплава.

Следующий этап затвердевания отливки характеризуется завершением процесса кристаллизации расплава в тонких частях отливки с образованием осевой усадочной пористости, а также началом затвердевания расплава в наиболее толстых стенках отливки и элементах ЛПС (см. рис. 11.21,г). Последний этап в затвердевании отливки, в общем случае, характеризуется завершением процесса кристаллизации расплава в форме с образованием усадочной раковины открытого типа в ЛВ и усадочных раковин закрытого типа — в прибыли, с образованием в осевой части стенок отливки усадочной пористости и, в случае неких узлов (см. рис. 11.21,д).

Рассматривая вышеописанный процесс затвердевания расплава в форме, следует отметить, что он характерен для отливок, имеющих относительно толстые стенки, или для отливок, у которых заливку расплава в форму проводили с очень высокой удельной скоростью поступления расплава в форму.

При изготовлении тонкостенных отливок, как правило, процесс заполнения формы расплавом сопровождается образованием твердой фазы уже в потоке расплава, заполняющего рабочую полость формы. При этом для тонкостенного литья характер образования твердой фазы в потоке расплава во многом предопределяет местонахождение и величину усадочной пористости в стенках отливок, что особенно важно для отливок, работающих в условиях высоких давлений, вакуума или агрессивных сред.

Следует отметить, что в условиях пристеночного образования твердой фазы в потоке расплава усадочная пористость формируется, в основном, в осевой части стенки отливки и носит сосредоточенный характер. В случае образования твердой фазы по всему сечению потока расплава кристаллизация расплава приобретает объемный характер и, соответственно, усадочная пористость рассредоточена по всей толщине стенки отливки. Естественно, что у отливок с рассредоточенным характером расположения усадочной пористости вероятность их негерметичности очень велика и, соответственно, механическую обработку поверхностей таких отливок желательно не проводить.

Одним из важнейших параметров процесса затвердевания отливки является время затвердевания её отдельных стенок и узлов. Располагая такими данными, можно оценить последовательность затвердевания различных частей отливки, выявить вероятные места образования усадочных дефектов в отливке и в соответствии с этим предпринимать соответствующие меры по недопущению образования в отливке значительных усадочных дефектов.



Анализа формулы и хода зависимостей, представленных на рис. 11.22 позволяет утверждать, что формула (11.16), в целом, адекватно описывает влияние основных параметров на длительность затвердевания отливок, получаемых методом литья по выплавляемым моделям. Определённое расхождение в длительности затвердевания отливок при начальных температурах КО менее 1100°C объясняется отступлением реальных значений параметров отливок и КО, принятых для расчёта.

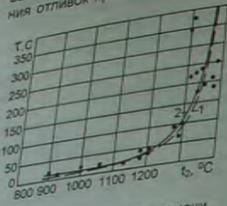


Рис. 11.22. Зависимость времени затвердевания плоской отливки из никелевого сплава от начальной температуры КО

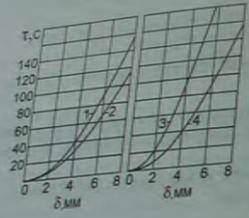


Рис. 11.23. Зависимость времени затвердевания плоской стенки отливки от её толщины, при начальной температуре КО t\_0=950°C

силлиманита,  $b_2 = 1742 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0.5} / (\text{М}^2 \cdot \text{C}^\circ)$ , затвердевание отливки - на воздухе. Сравнивая зависимости 3 и 4, приведенные на рис. 11.23, следует обратить внимание на различие длительности затвердевания одних и той же отливок на воздухе и в вакууме. Это различие вызвано тем, что одна и та же КО, находясь в вакууме и на воздухе, имеет различную величину коэффициента теплопроводности (см. табл. 6.60).

Значения величин  $\tau$ , рассчитанные по формуле (11.16), носят усреднённый характер и не учитывают длительности течения расплава по каналу формы, приводящему к значительному нагреву формы и, соответственно, повышению времени затвердевания различных частей стенки отливки. Время затвердевания расплава в каком-либо поперечном сечении плоской отливки с момента прекращения заполнения канала формы расплавом, в зависимости от длительности течения расплава при заливке через данное сечение [5], можно рассчитать по формуле (с):

На рис. 11.23 представлены зависимости длительности затвердевания плоской отливки от её толщины, при начальной температуре КО  $t_0 = 950^\circ\text{C}$ , заформованной опорный наполнитель. Зависимости температуры в деформации по формуле (11.16). Для построения зависимостей были приняты следующие параметры КО и сплавов:

- зависимость 1 - сталь 10Х18Н9Л,  $\rho_1 = 7020 \text{ кг/м}^3$ ,  $L = 286000 \text{ Дж/кг}$ ,  $t_{кр} = 1450^\circ\text{C}$ , КО изготовлена на основе песка кварцевого, ГРЭС и пылевидного,  $b_2 = 1144 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0.5} / (\text{М}^2 \cdot \text{C}^\circ)$ , затвердевание отливки - на воздухе;
- зависимость 2 - сталь 35Л,  $\rho_1 = 7050 \text{ кг/м}^3$ ,  $L = 259000 \text{ Дж/кг}$ ,  $t_{кр} = 1480^\circ\text{C}$ , КО изготовлена на основе песка кварцевого, ГРЭС и пылевидного,  $b_2 = 1144 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0.5} / (\text{М}^2 \cdot \text{C}^\circ)$ , затвердевание отливки - на воздухе;
- зависимость 3 - сплав никелевый ЖС-8К,  $\rho_1 = 8190 \text{ кг/м}^3$ ,  $L = 296000 \text{ Дж/кг}$ ,  $t_{кр} = 1345^\circ\text{C}$ , КО изготовлена на основе белого электро-силлиманита,  $b_2 = 1154 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0.5} / (\text{М}^2 \cdot \text{C}^\circ)$ , затвердевание отливки - в вакууме;
- зависимость 4 - сплав никелевый ЖС-8К,  $\rho_1 = 8190 \text{ кг/м}^3$ ,  $L = 296000 \text{ Дж/кг}$ ,  $t_{кр} = 1345^\circ\text{C}$ , КО изготовлена на основе белого электро-силлиманита,  $b_2 = 1742 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0.5} / (\text{М}^2 \cdot \text{C}^\circ)$ , затвердевание отливки - на воздухе.

$$\tau = \frac{n+1}{n} \left( \frac{R \cdot \rho_1}{b_2 \cdot T_{кр}} \right)^2 \left( q_{теч} + q_{пер} + \frac{L}{2} \right) \cdot L + \tau_{отв} \quad (11.17)$$

где  $n$  - показатель степени параболы распределения температурного поля в стенке формы;  $R$  - половина толщины стенки отливки,  $m$ ,  $\rho_1$  - плотность металла в твердом состоянии (при температуре  $-0.9T_{\Delta 3}$ );  $b_2$  - коэффициент теплоаккумулирующей способности формы,  $\text{Вт} \cdot \text{с}^{0.5} / (\text{М}^2 \cdot \text{C}^\circ)$ ;  $T_{кр}$  - температура кристаллизации металла отливки,  $K$ ;  $T_L$  и  $T_{\Delta 3}$  - температура ликвидус и солидус сплава соответственно,  $K$ ;  $q_{теч}$  и  $q_{пер}$  - удельная теплота течения и перегрева металла отливки,  $\text{Дж/кг}$ ;  $L$  - удельная теплота кристаллизации металла отливки,  $\text{Дж/кг}$ ;  $t_{пер}$  - время отвода теплоты перегрева от расплава в рассматриваемом сечении формы в стенке формы, с.

$$T_{кр} = \frac{T_L + T_{\Delta 3}}{2}$$

Значение времени отвода теплоты перегрева от расплава в рассматриваемом сечении формы в стенке формы рассчитываем по формуле (с):

$$\tau_{пер} = \frac{n+1}{n} \left( \frac{R \cdot \rho_1 \cdot c_1}{b_2} \right)^2 \left[ \left( \frac{q_{теч}}{c_1} + T_{теч} \right) \cdot \left( \frac{1}{T_{кр}} - \frac{1}{T_{теч}} \right) - \ln \frac{T_{теч}}{T_{кр}} \right] + \tau_{теч}$$

где  $c_1$  - удельная теплоёмкость жидкого металла,  $\text{Дж/кг} \cdot \text{град}$ ;  $T_{теч}$  - средняя температура течения расплава через рассматриваемое сечение в форме,  $K$ ;  $t_{теч}$  - длительность течения расплава через рассматриваемое сечение формы, с.

$$T_{теч} = T_L + \Delta T_{пер}$$

где  $\Delta T_{пер}$  - температура перегрева расплава над температурой ликвидус сплава отливки,  $K$ .

Значения  $q_{теч}$  и  $q_{пер}$  рассчитываем по формулам:

$$q_{пер} = c_1 \cdot (T_{теч} - T_{кр});$$

$$q_{теч} = \frac{Q_{теч}}{M_i};$$

$$Q_{теч} = F \cdot b_2 \cdot T_{теч} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot n \cdot \tau_{теч}}{n+1}}$$

где  $Q_{теч}$  - количество тепла, аккумулированное участком формы в рассматриваемом сечении отливки за время течения через него расплава,  $\text{Дж}$ ;  $M_i$  - масса отливки в рассматриваемом ( $i$ -том) сечении формы;  $F$  - площадь соприкосновения рассматриваемого элемента отливки с формой,  $\text{м}^2$ .

В расчёте времени затвердевания плоской стенки отливки величину  $n$  для КО, изготовленной на основе кварцевого песка и пылевидного кварца, а также на осно-

ве белого электрокундуна, рекомендуется рассчитывать по эмпирическому уравнению, полученному автором (для КО с начальной температурой от 600 до 1000°C):

$$n = 5 - 0,005 \cdot c_2 \cdot \left( \frac{t_L + t_2}{t_L + t_S} \right), \quad (11.18)$$

где  $c_2$  – удельная теплоёмкость материала формы при температуре  $t_2$ , Дж/(кг·град).  
**Пример 11.3.** Рассчитать длительность затвердевания расплава в i-том сечении плоской стенки отливки (толщина стенки  $\delta=2R=0,004$  м) из стали 35Л, затвердевающей в КО, изготовленной на основе кварцевого песка, кварца пылевидности ГРЭС, и заформованной в опорный наполнитель – кварцевый песок. Начальная температура КО и опорного наполнителя –  $t_2=950^\circ\text{C}$ . Для расчётов примем следующие значения величин:  $n_2=2,5$ ;  $T_L=1778$  К;  $T_S=1733$  К;  $b_2=1144$  Вт·с<sup>0,5</sup>/м<sup>2</sup>;  $\Delta T_{\text{ПЕР}}=60$  К;  $R=0,002$  м;  $L=259000$  Дж/кг;  $c_1^i=960$  Дж/(кг·град);  $\rho_i=7200$  кг/м<sup>3</sup>. Длительность течения расплава в форме через её i-тое сечение –  $\tau_{\text{ТЕЧ}}=10$  с.  
 Для начала расчёта, прежде всего, необходимо определить значения величин  $F$  и  $M_i$ .

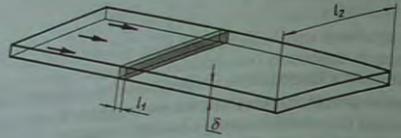


Рис. 11.24. Схема к расчёту величин  $F$  и  $M_i$  (стрелками указано направление течения расплава)

$M_i$ , то, приняв  $l_1=0,001$  м и  $l_2=1$  м, величина  $F$  составит:

$$F = 2(\delta \cdot l_1 + l_1 \cdot l_2) = 2(0,004 \cdot 0,001 + 0,001 \cdot 1) = 0,002004 \text{ м}^2.$$

Зная величины  $\delta=0,004$  м и приняв  $l_1=0,001$  м и  $l_2=1$  м, несложно рассчитать значение величины  $M_i$ :

$$M_i = \rho_i \cdot \delta \cdot l_1 \cdot l_2 = 7200 \cdot 0,004 \cdot 0,001 \cdot 1 = 0,0288 \text{ кг},$$

$$T_{\text{КР}} = \frac{T_L + T_S}{2} = \frac{1778 + 1733}{2} = 1755,5 \text{ К},$$

$$T_{\text{ТЕЧ}} = T_L + \Delta T_{\text{ПЕР}} = 1788 + 60 = 1848 \text{ К},$$

$$Q_{\text{ПЧ}} = F \cdot b_2 \cdot T_{\text{ПЧ}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot n \cdot \tau_{\text{ПЧ}}}{n+1}} = 0,002004 \cdot 1144 \cdot 1848 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 2,5 \cdot 10}{2,5+1}} = 16013 \text{ Дж},$$

$$q_{\text{ПЧ}} = \frac{Q_{\text{ПЧ}}}{M_i} = \frac{16013}{0,0288} = 556012 \text{ Дж/кг}.$$

$$q_{\text{ПЕР}} = c_1^i \cdot (T_{\text{ПЧ}} - T_{\text{КР}}) = 960(1848 - 1755,5) = 88800 \text{ Дж/кг}.$$

Исходя из вычисленных значений переменных, длительность отвода теплоты от расплава в i-том сечении отливки составит:

$$\tau_{\text{ПЕР}} = \frac{n+1}{n} \left( \frac{R \cdot \rho_i \cdot c_1^i}{b_2} \right)^2 \left[ \left( \frac{q_{\text{ПЧ}} + q_{\text{ПЕР}}}{c_1^i} + T_{\text{ПЧ}} \right) \left( \frac{1}{T_{\text{КР}}} - \frac{1}{T_{\text{ПЧ}}} \right) - \ln \frac{T_{\text{ПЧ}}}{T_{\text{КР}}} \right] =$$

$$= \frac{2,5+1}{2,5} \left( \frac{0,002 \cdot 7200 \cdot 960}{1144} \right)^2 \left[ \left( \frac{556012 + 1848}{960} \right) \left( \frac{1}{1755,5} - \frac{1}{1848} \right) - \ln \frac{1848}{1755,5} \right] = 3,65 \text{ с}.$$

Подставляя полученные значения в формулу (11.17), получаем:

$$\tau = \frac{n+1}{n} \left( \frac{R \cdot \rho_i}{b_2 \cdot T_{\text{КР}}} \right)^2 \left( q_{\text{ПЧ}} + q_{\text{ПЕР}} + \frac{L}{2} \right) L + \tau_{\text{ПЕР}} =$$

$$= \frac{2,5+1}{2,5} \left( \frac{0,002 \cdot 7200}{1144 \cdot 1755,5} \right)^2 \left( 556012 + 88800 + \frac{259000}{2} \right) \cdot 259000 + 3,65 = 18 \text{ с}.$$

То есть в рассматриваемых условиях длительность затвердевания отливки в i-том сечении, с момента окончания течения расплава в форме, составит  $\tau=18$  с.

Результаты расчёта  $\tau$  для вышеприведённых условий при длительности течения расплава в форме от  $\tau_{\text{ТЕЧ}}=0$  до  $\tau_{\text{ТЕЧ}}=20$  с представлены на рис. 11.25 (толщина стенки отливки  $\delta=4$  мм, материал отливки – сталь 35Л).

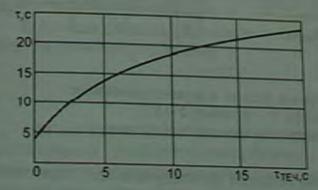


Рис. 11.25. Зависимость длительности затвердевания плоской отливки из стали 35Л от длительности течения расплава в форме

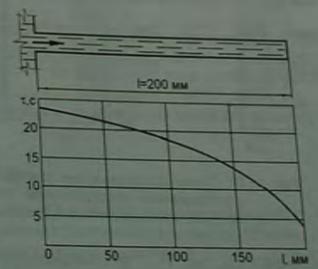


Рис. 11.26. Зависимость длительности затвердевания плоской отливки из стали 35Л от расстояния от питателя (l)

Применительно к реальным условиям получения отливок, полученный результат можно интерпретировать следующим образом. Если изготавливают плоскую отливку протяженностью  $l=200$  мм с толщиной стенки  $\delta=4$  мм из стали 35Л при вышерассмотренных условиях, со щелевидное рабочей полости формы в рабочую полость расплава в канале  $W=10$  мм/с, то полученный нами результат расчёта течения расплава в процессе затвердевания расплава в различных поперечных сечениях, являющейся временем затвердевания расплава, начиная от её торца до питателя, для неё отливки (вдоль отливки), начиная от её торца до питателя, что схематично представлено на рис. 11.26 (на рис. 11.26 направление течения расплава при заполнении щелевого канала формы обозначено стрелкой).

Рассматривая вопрос о расчёте длительности затвердевания отливки, следует отметить, что на сегодняшний день известные упрощённые уравнения позволяют с определённой степенью точности рассчитать время затвердевания лишь для отливок простой конфигурации (пластина, цилиндр, шар и т.п.), затвердевающих в условиях, когда форму можно рассматривать как полубесконечную.

То есть форму, однородную по своим теплофизическим свойствам в любой точке её объёма и охлаждение которой с её внешней стороны не влияет на точку затвердевания отливки.

Используя формулы (11.16) и (11.17), использованные нами для расчёта, были получены формулы (11.16) и (11.17), использованные нами для расчёта, были получены именно для вышеуказанных условий затвердевания отливок. Поэтому, возвращаясь к данным формулам, следует определить границы их применимости, для чего воспользуемся рис. 11.27, где представлены схемы распределения температуры в КО, а также в монолитной форме (гипсовый) в момент окончания затвердевания в них плоской стенки отливки толщиной  $\delta=2R$ .

На рис. 11.27 представлены распределённые в реальных условиях затвердевающей отливки с формой, наиболее распространённые в реальных условиях изготовления отливок методом литья по выплавляемым моделям.

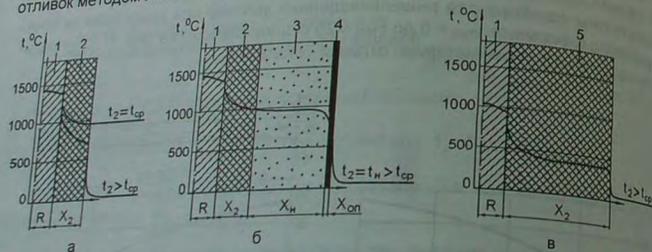


Рис. 11.27. Схемы распределения температуры в форме в момент окончания затвердевания плоской стенки отливки: 1 – отливка; 2 – КО; 3 – опорный наполнитель; 4 – стенка опоки; 5 – монолитная форма

Схема 1 (см. рис. 11.27,а) – затвердевание отливки на воздухе в предварительно нагретой КО, незаформованной в опорный наполнитель или термостат. В этом случае, для заливки КО извлекают из прокаточной печи, устанавливают на заливочный плав и, спустя некоторое время, заливают расплавом. В таком состоянии залитая КО находится на плаву до окончания затвердевания расплава в ней.

Данная схема заливки КО характеризуется тем, что в процессе выдержки на воздухе до заливки температура КО понижается, поскольку:

где  $t_2$  – начальная температура КО;  $t_{cp}$  – температура среды, окружающей КО (температура воздуха на плавно-заливочном участке литейного цеха).

В этом случае для проведения аналитических расчётов времени затвердевания отливки необходимо, помимо всего прочего, учитывать теплоотдачу с внешней поверхности КО, которая начинается с момента извлечения КО из прокаточной печи и изменяется как в процессе охлаждения КО до заливки, так и в процессе затвердевания отливки. То есть в расчётах следует учитывать поверхность по уравнению:

$$q_0 = \alpha_K \cdot (T_2 - T_{cp}) + \epsilon_0 \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_{cp}^4), \quad (11.19)$$

где  $\alpha_K$  – коэффициент конвективного теплообмена между поверхностью КО и воздухом, Вт/л ( $m^2 \cdot K$ );  $T_2$  – температура поверхности КО, К;  $T_{cp}$  – температура окружающей среды (воздуха), К;  $\epsilon_0$  – постоянная, характеризующая степень черноты тела;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  – постоянная Стефана-Больцмана

В уравнении (11.19) первое слагаемое учитывает теплообмен между поверхностью КО и воздухом, второе – теплопередачу излучением с поверхности КО в окружающей среде является причиной того, что к моменту заливки КО расплавом, температура как её отдельных частей, так и её отдельных элементов, значительно отличается от их начальной температуры ( $t_2$ ) – температуры прокаливания. В реальных условиях получения отливок температурное поле такой КО, сформировавшееся к моменту заливки, характеризуется нестабильностью, а затвердевание как отливки в целом, так и её отдельных частей – непредсказуемостью. В связи с этим величины длительности затвердевания плоской отливки, полученные в результате расчёта по формулам (11.16) и (11.17), будут не корректны и, соответственно, в данном случае использование формул (11.16) и (11.17) для проведения расчётов – не рекомендуется.

Схема 2 (см. рис. 11.27,а) – соответствует затвердеванию отливки либо в КО, предварительно упакованной в термостат для прокаливания и заливки, либо в КО, установленном для заливки в специальную нагревательную печь (электрический термостат).

В данной схеме затвердевания начальная температура КО до её заливки остаётся неизменной, поскольку:

$$t_2 = t_{cp}.$$

Тем не менее если теплоёмкости стенок КО, залитой расплавом, окажется недостаточной для поглощения теплоты течения расплава по каналам формы, теплоты перегрева расплава и теплоты кристаллизации расплава в форме, то, в этом случае произойдёт повышение температуры на внешней поверхности КО до окончания процесса затвердевания расплава в КО и дальнейшая теплопередача от затвердевающей отливки в форму будет происходить на фоне теплопередачи от внешней поверхности КО в окружающую среду ( $t_2 > t_{cp}$ ).

Рассматривая данную схему теплопередачи при затвердевании отливки, можно констатировать, что затвердевание в КО в данных условиях можно считать аналогичной затвердеванию отливки в полубесконечной форме, если:

$$\tau_0 \leq \tau_2,$$

где  $\tau_0$  – время затвердевания расплава в  $i$ -том сечении канала формы (с учётом времени течения расплава через это сечение в процессе заливки формы);  $\tau_2$  – время прогрева стенки формы на глубину  $X_2$  в  $i$ -том сечении канала формы. То есть, приняв  $\tau_0 = \tau_2$ , можно записать [302]:

$$X_2 = \sqrt{2 \cdot n \cdot (n+1) \cdot a_2 \cdot \tau_0}, \quad (11.20)$$

$$a_2 = \frac{\lambda_2}{\rho_2 \cdot c_2}, \quad (11.21)$$

где  $a_2$  – коэффициент температуропроводности материала формы,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $c_2$  – теплоёмкость материала формы,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$ ;  $\rho_2$  – плотность материала формы,  $\text{кг}/\text{л}$ ;  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности материала формы,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$ ;  $n$  – см. уравнение (11.18).

Приняв для КО, изготовленной на основе кварцевого песка, кварца пылевидного и ГРЭС (при  $950^\circ\text{C}$ ),  $a_2 = 6,96 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $n=2,5$  и, по данным рис. 11.25 –  $\tau_{\text{ГРЭС}} = 15 \text{ с}$  и  $\tau = 22 \text{ с}$ , несложно рассчитать величину  $X_2$  по формуле (11.21):

$$\tau_0 = \tau_{\text{ГРЭС}} + \tau = 15 + 22 = 37 \text{ с};$$

$$X_2 = \sqrt{2 \cdot n \cdot (n+1) \cdot a_2 \cdot \tau_0} = \sqrt{2 \cdot 2,5 \cdot (2,5+1) \cdot 6,96 \cdot 10^{-7} \cdot 37} = 0,021 \text{ м}.$$

То есть затвердевание плоской отливки с толщиной стенки  $\delta=4 \text{ мм}$  из стали 35Л в данных условиях можно рассматривать как затвердевание в полубесконечной форме, если толщина стенки КО составит не менее  $X_2=21 \text{ мм}$ .

В реальных условиях производства литья по выплавляемым моделям толщина стенок КО, как правило, не превышает  $10 \text{ мм}$ . Поэтому для данной схемы расчёт по формулам (11.16) и (11.17) даёт адекватные значения времени затвердевания отливки в КО только при выполнении условия (11.20).

Схема 3 (см. рис. 11.27, б) – КО заформована в опорный наполнитель, имеющих величины показателей теплофизических свойств равные или отличающиеся от величин показателей аналогичных свойств материала КО не более чем на  $10 \dots 15\%$ .

В данном случае высокая абсолютная теплоёмкость и низкая теплопроводность неметаллического материала опорного наполнителя позволяет сохранить к моменту заливки не только начальную температуру КО, но и начальную температуру слёв опорного наполнителя, достаточно удалённых от стенок КО. Поэтому затвердевание отливки по данной схеме можно рассматривать как затвердевание отливки в полубесконечной форме и рекомендовать для данной схемы использование формул (11.16) и (11.17).

Схема 4 (см. рис. 11.27, в) – монолитная форма. Монолитная форма не содержит КО и достаточно массивна, что позволяет рассматривать процесс затвердевания в такой форме как в полубесконечной и рекомендовать использование уравнения (11.16) и (11.17) для проведения соответствующих расчётов.

Для определения времени затвердевания плоских стенок отливок из титановых сплавов в ОГ можно воспользоваться номограммой, приведенной на рис. 11.28 [290].

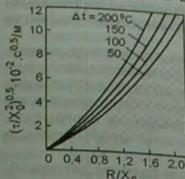


Рис. 11.28. Номограмма для определения продолжительности затвердевания титановых отливок в ОГ

Номограмма, представленная на рис. 11.28, построена для графитовых оболочковых форм, заформованных в опорный наполнитель из титановой губки и  $t_2=20 \dots 30^\circ\text{C}$ .

Для определения времени затвердевания ( $t$ ) по номограмме, представленной на рис. 11.28, прежде всего необходимо определить величину соотношения половины толщины стенки отливки ( $R$ ) и толщины стенки ОГ ( $X_0$ ). После этого, приняв соответствующую величину перегрева расплава ( $\Delta t$ ), соответствующую форму, определяют значение  $(\pi X_0^2)^{0,5} \cdot 10^{-2}$ , откуда рассчитывают время затвердевания отливки –  $t$ .

**Пример 11.4. (Пример пользования номограммой, представленной на рис. 11.28).** Используя номограмму, представленную на рис. 11.28, рассчитаем стенки отливки составляет  $2R=0,004 \text{ м}$ , толщина формы –  $X_0=0,01 \text{ м}$ , величина перегрева расплава над температурой обочковкой сплава –  $\Delta t=150^\circ\text{C}$ .

Для расчёта определим величину соотношения  $R/X_0=0,002/0,01=0,2$ . Получив величину соотношения  $R/X_0$ , по номограмме на рис. 11.28 для перегрева, равного  $\Delta t=150^\circ\text{C}$ , находим, что величина соотношения:

$$0,01 \cdot \sqrt{\frac{\tau}{X_0^2}} = 1 \text{ или } \sqrt{\frac{\tau}{X_0^2}} = 100.$$

Решая полученное уравнение относительно величины  $\tau$ , находим:

$$\tau = 10000 \cdot X_0^2 = 10000 \cdot 0,01^2 = 1 \text{ с}.$$

То есть время затвердевания стенки отливки при указанных выше параметрах составит  $\tau = 1 \text{ с}$ .

Зависимость длительности затвердевания титановых отливок от толщины их стенки, рассчитанная с помощью номограммы, представлена на рис. 11.29 (температура перегрева расплава при заливке  $\Delta t=60 \dots 80^\circ\text{C}$ ), где точками обозначены экспериментальные данные.

Как было отмечено выше, затвердевание расплава в форме происходит неравномерно. В первую очередь затвердевает расплав в наиболее тонких стенках отливки, во вторую очередь – в более массивных (толстых) стенках. При этом более толстые стенки отливки, по отношению к стенкам меньшей толщины, в процессе затвердевания металла являясь своеобразными прибылями. В свою очередь,

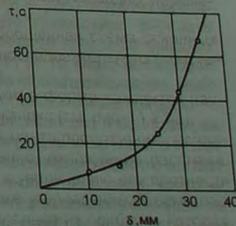


Рис. 11.29. Зависимость длительности затвердевания титановых отливок от толщины их стенки [290]

более толстые стенки отливки при затвердевании питаются жидким металлом от приливов, коллекторов и других более массивных элементов ЛПС, установленных на них. Нарушение описанной последовательности затвердевания отдельных частей отливки приводит к образованию в них значительных усадочных дефектов (усадочной пористости, рыхлот, раковин).

У литых деталей общемашиностроительного назначения присутствие усадочной пористости свойств. Поэтому, для данной категории отливок в отношении усадочных дефектов основной задачей является недопущение образования в отливках усадочных дефектов значительных размеров, выходящих на поверхность отливок (усадочных раковин и рыхлот открытого типа, выявляемых невооружённым глазом).

Несколько иначе обстоит дело с тонкостенными отливками (литыми деталями), работающими в условиях высокого давления, вакуума, агрессивных газовых и жидких сред и т.п. В этих случаях наличие значительной усадочной пористости или рыхлоты в теле отливки негативно сказывается на её механических свойствах, герметичности, коррозионной стойкости и т.п. [105; 212; 290 и др.], о чём, в частности, свидетельствуют зависимости, представленные на рис. 11.30 и рис. 11.31.

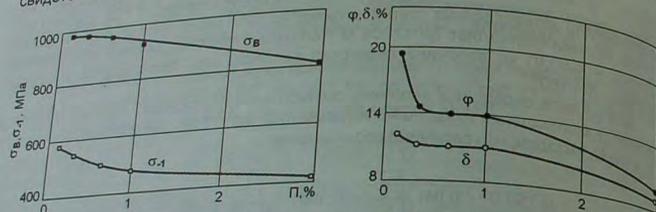


Рис. 11.30. Зависимость механических свойств титановых сплавов от величины их усадочной пористости

На рис. 11.30 представлены зависимости влияния величины усадочной пористости (П) в титановых отливках на их механические свойства [290], а на рис. 11.31 представлена зависимость относительного изменения величины предела прочности углеродистой стали от её плотности — величины, обратной величине пористости [212].

Анализ зависимостей, представленных на рис. 11.30 и рис. 11.31, показывает, что с увеличением величины усадочной пористости в отливках механические свойства их металла существенно понижаются. Поэтому получение плотных отливок с заданной макроструктурой и фазовым составом является одной из важнейших задач литейного производства.

Рассматривая вопрос о пористости отливок, прежде всего, классифицируем её по следующим видам [236].

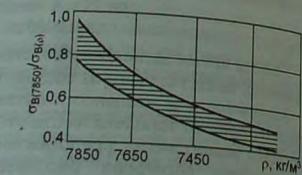


Рис. 11.31. Зависимость относительной величины предела прочности углеродистой стали от её плотности, где  $\sigma_{в(7850)}$  — предел прочности стали с плотностью  $\rho=7850 \text{ кг/м}^3$

Микропористость — локальные пустоты (поры) в теле отливки и на поверхности отливки, располагающиеся между ветвями дендрита. Размеры таких пустот соизмеряны с размерами поперечного сечения ветвей дендрита. Размеры таких пустот соизмеряны с размерами поперечного сечения ветвей дендрита. Как правило, величина микропористости в отливках не превышает 0,3...0,5% (по объёму).

Макропористость — локальные или сообщающиеся между собой пустоты, распустот соизмеряны с размерами междендритного пространства. Размеры таких ства. Как правило, величина макропористости в отливках не превышает 2,5...3,5% (по объёму).

Рыхлота — сплошная или локальная пустота, как правило, располагающаяся в осевой части сечения стенки отливки. По размерам рыхлота соизмеряна с размерами (толщиной) стенки отливки. Величина рыхлот в стенке отливки достигает 6...10% (по объёму).

В литых деталях усадочная пористость присутствует всегда и в условиях прочисту методов неразрушающего контроля относятся — методы проникающего излучения, методы капиллярной дефектоскопии, магнитная дефектоскопия, гидро- или пневмоиспытания и др. Каждый из методов определения дефектоскопии, гидро- или ливках имеет свои ограничения (уровень чувствительности). Например, используя метод рентгеновской дефектоскопии можно определить присутствие в отливках выявлять в отливке только рыхлоты, результаты гидро- и пневмоиспытания позволяют судить о наличии в стенках отливки сообщающихся между собой и выходящих на поверхности отливки (сквозных) пор (течей), методы капиллярной дефектоскопии позволяют выявить сквозные и тупиковые микропоры, выходящие на поверхность отливки и т.д. Наличие и уровень внутренней микропористости или рассеяния методами капиллярной дефектоскопии после порезки отливки.

Величину и характер расположения усадочной пористости в стенке отливки предопределяет макроструктура металла, которая, в свою очередь, зависит от характера затвердевания расплава в форме.

Характер затвердевания жидких металлов и сплавов зависит от интенсивности теплоотвода от расплава, которую оценивают по величине скорости охлаждения ( $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ ) или скорости продвижения фронта кристаллизации (мм/с), называемой также скоростью затвердевания.

При всех прочих равных условиях, для каждого металла и сплава существуют определённые "пороговые" скорости затвердевания, обуславливающие переход от одного типа макроструктуры к другому, что схематично представлено на рис. 11.32.

Например, при скорости охлаждения расплава более  $10^{10}...10^{14} \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  (скорость продвижения условного фронта кристаллизации порядка  $U=10^{-16} \text{ мм/с}$ ) сплавы приобретают аморфную структуру (металлические "стёкла"). При значительно меньших скоростях охлаждения (скоростях затвердевания реальных отливок) сплавы приобретают структуру поликристаллического тела. Причём, в зависимости от скорости затвердевания, твёрдый сплав может состоять из дезориентированных равноосных кристаллов и/или кристаллов столбчатого типа. Например, при непосредственном контакте расплава с чугунной изложницей, водоохлаждаемым металлическим холодильником и пр. на поверхности слитка (отливки) образуется слой дезориентированных мелких равноосных кристаллов (так называемый слой "замороженных" или гранулярных кристаллов), характеризующийся высокой плотностью (низкой пористостью) металла и отсутствием дендритных ветвей в кристаллах.

При более низкой скорости затвердевания в отливке (слитке) формируется зона со столбчатыми кристаллами. Дальнейшее понижение скорости затвердевания отливки приводит к переходу от зоны столбчатых кристаллов к зоне крупных ориентированных равноосных кристаллов (см. рис. 11.32).

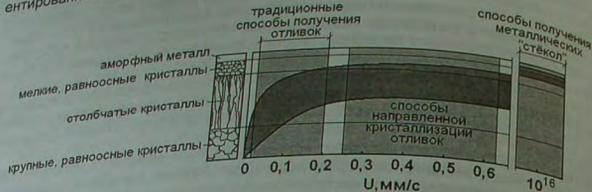


Рис. 11.32. Зависимость типа макроструктуры от скорости затвердевания расплаво

Переход от одного типа макроструктуры к другому для каждого конкретного сплава происходит при определенной скорости затвердевания (скорости продвижения фронта кристаллизации). Если скорость затвердевания (скорости происходит переход от аморфной структуры к мелкозернистой равноосной (гранулярной) структуре, от мелкозернистой равноосной (гранулярной) структуры к столбчатой и от столбчатой к крупнозернистой равноосной структуре, обозначить соответственно,  $U_{AP}$ ,  $U_{PC}$  и  $U_{CP}$ , то, например, переход от зоны мелких равноосных ("замороженных", гранулярных) кристаллов к зоне столбчатых кристаллов для сплава алюминия с 3% Si, по данным [16], происходит при скорости затвердевания  $U_{PC} \leq 0,31$  мм/с, для сплава ЮНДК35Т5 – при  $U_{PC} \leq 0,033$  мм/с [17] и т.д.

Значения перечисленных пороговых скоростей затвердевания для каждого сплава индивидуальны и, при всех прочих равных условиях, зависят от чистоты расплава по примесям, степени его легирования и природы легирующих элементов, термовременных условий плавки, внешних воздействий на кристаллизующий расплав и т.п. То есть от всех параметров, предопределяющих величину концентрационного переохлаждения перед фронтом кристаллизации затвердевающего сплава.

На рис. 11.33 представлены схемы типовых макроструктур, характер распределения и относительная величина усадочной пористости в стенках реальных отливок. Равноосная (см. рис. 11.33,а), смешанная (см. рис. 11.33,б) и транскристаллитная (см. рис. 11.33,с) макроструктура присуща отливкам, полученным в условиях всестороннего теплоотвода от поверхности отливок ("традиционный" способ изготовления отливок).

Направленно-столбчатую (см. рис. 11.33,д) и монокристаллическую (см. рис. 11.33,е) макроструктуру в отливках получают в условиях направленного теплоотвода от затвердевающей отливки.

Гранулярную макроструктуру (см. рис. 11.33,ф) в отливках получают либо в условиях высокоинтенсивного теплоотвода от расплава отливки, имеющего невысокий перегрев, либо в условиях затвердевания расплава под высоким давлением.

В зависимости от типа макроструктуры, ориентации и размеров её зерен, величины пористости, размера и типа пор, а также характера расположения пористости

в стенке отливки, литая деталь приобретает определенные механические, физико-химические, технологические и эксплуатационные свойства.

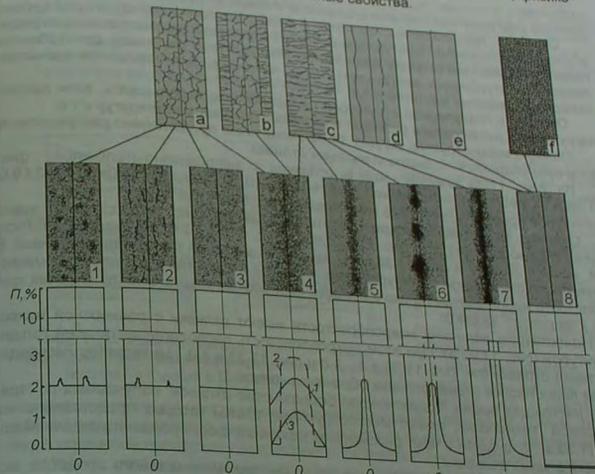


Рис. 11.33. Типы макроструктур, характер расположения пористости в поперечном сечении стенки отливки и её распределение ( $P_i, \%$ ) по ширине стенки отливки

Из перечисленных свойств для большинства изготавливаемых отливок наиболее важными являются показатели их механических свойств и герметичность.

Так, например, для отливок, работающих при низких и нормальных температурах в условиях значительной статической или динамической нагрузки, лучшее сочетание механических свойств обеспечивает равноосная мелкозернистая макроструктура (см. рис. 11.33,а). Для отливок, работающих при температуре 700...1100°C в условиях динамических нагрузок, предпочтительной является равноосная крупнозернистая макроструктура.

Получение отливок со смешанной макроструктурой (см. рис. 11.33,б) предпочтительнее, если отливка работает в условиях средних механических нагрузок и высокого давления. Дело в том, что зона столбчатых кристаллов является наиболее плотной и наименее загрязненным по Н.В. слою отливки. По сути, толщина зоны столбчатых кристаллов в стенке отливки и является её так называемой "литевой" корочкой, которая обеспечивает герметичность отливки, а зона равноосных кристаллов в стенке отливки обеспечивает преимущественно её механическую прочность.

Отливки с транскристаллитной структурой (см. рис. 11.33,с) целесообразно использовать в случае, когда литая деталь работает в условиях вакуума или повышенного давления при незначительных статических нагрузках.

Отливки с направленно-столбчатой и монокристаллической структурой целесообразно использовать, если деталь работает в условиях однонаправленного вращающего действия газотурбинных двигателей), либо, например, для повышения магнитных свойств постоянных магнитов и т.д.

Отливки с гранулярной структурой целесообразно использовать, если высоконагруженная литая деталь работает в широком интервале температур и т.п. Помимо макроструктур, на рис. 11.33 схематично представлено распределение величины усадочной пористости в стенке отливки.

Из рис. 11.33 следует, что в отливках с направленно-столбчатой (рис. 11.33,д,8.0) монокристаллической (рис. 11.33,е,8.0) и гранулярной (рис. 11.33,г,8.0) структурой присутствует только микропористость ( $\Pi < 0,3...0,5\%$ ).

Отливки, имеющие транскристаллитную структуру (рис. 11.33,с), могут иметь значительную рыхлоту (см. рис. 11.33,с,6.0 и рис. 11.33,с,7.0) или макропористость (см. рис. 11.33,с,5.0 и рис. 11.33,с,4.0, кривая 3) в осевой части стенки отливки. В отливках со смешанной структурой (рис. 11.33,б,4.0) значительное развитие макропористости наблюдается только в области равноосных кристаллов (пунктирная кривая 2 на рис. 11.33,б,4.0).

Наибольшую величину макропористости имеют отливки с равноосной макроструктурой (рис. 11.33,а). При этом макропористость располагается по всей толщине стенки отливки (см. рис. 11.33,а,1...3,0 и рис. 11.33,а,4.0, где характер распределения пористости в стенке отливки обозначен кривой 1).

В настоящее время, подавляющее большинство отливок, получаемых по "традиционной" технологии, имеют макроструктуры, схемы которых представлены на рис. 11.33,а...с, в связи с чем, рассмотрим механизм формирования усадочной пористости в таких отливках.

Прежде всего, с целью упрощения описания рассматриваемого процесса, используя параметрический критерий:

$$K_R = \frac{2 \cdot (t_L - t_S)}{t_L + t_S}, \quad (11.22)$$

где  $t_L$  и  $t_S$  – температуры ликвидус и солидус сплава, соответственно,  $^{\circ}\text{C}$ , применив следующую классификацию сплавов.

Сплавами с "узким" температурным интервалом кристаллизации ("узкоинтервальные" сплавами) будем называть сплавы, у которых:

$$K_R \leq 0,035. \quad (11.23)$$

У сплавов со "средним" температурным интервалом кристаллизации ("среднеинтервальных" сплавов):

$$0,035 < K_R < 0,075. \quad (11.24)$$

У сплавов с "широким" температурным интервалом кристаллизации ("широкоинтервальных" сплавов):

$$K_R \geq 0,075.$$

(11.25)

При всех прочих равных условиях, природа сплава предопределяет его объемную усадку ( $V$ ) при переходе из жидкого в твердое состояние, а величина температурного интервала кристаллизации сплава предопределяет соотношение усадочных объемов, реализованных в затвердевшем металле в виде усадочной раковины ( $V_{VP}$ ) и усадочной пористости ( $V_{П}$ ).

То есть для каждого объема и типа сплава в общем:  $V = V_{VP} + V_{П}$ .

$$V = V_{VP} + V_{П} = \text{const.}$$

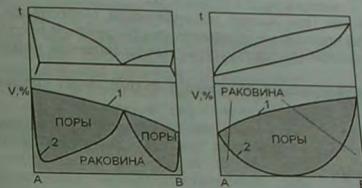


Рис. 11.34. Влияние температурного интервала кристаллизации сплава на распределение усадочных полостей в отливке в виде раковины и пор

Влияние величины интервала кристаллизации сплава (вида бинарной диаграммы состояния сплавов А-В) на распределение усадочного объема между раковинной и пористостью в отливках из этих сплавов представлено на рис. 11.34, где обозначены: 1 – общий объем усадочных пустот, 2 – объем усадочной раковины.

Из зависимостей, представленных на рис. 11.34, следует, что с увеличением величины интервала кристаллизации сплава доля его объемной усадки, реализованная в виде усадочной раковины, уменьшается, а доля усадки, реализованная в виде усадочной пористости, возрастает и, соответственно, наоборот.

Именно поэтому, "широкоинтервальные" сплавы склонны к образованию в отливках рассеянной усадочной пористости и небольшой усадочной раковины в прибыли, а "узкоинтервальные" сплавы склонны к образованию сосредоточенной усадочной пористости в осевой области стенки отливки, а также большой и глубокой усадочной раковины в прибыли. По этой же причине для отливок из "широкоинтервальных" сплавов объем используемых прибылей несколько больше, чем для аналогичных отливок из "узкоинтервальных" сплавов.

Тем не менее, соотношение усадочных пустот, представленное на рис. 11.34 для каждого конкретного сплава, можно существенно изменить, добываясь в процессе получения той или иной отливки максимально возможной плотности её металла в условиях принятой технологии производства литья.

Как было отмечено выше, при всех прочих равных условиях, объем, размер и характер расположения усадочной пористости в стенках отливок зависит не только от температурного интервала кристаллизации сплава, но и от характера образования твердой фазы в расплаве (характера затвердевания сплава). В свою очередь, характер затвердевания сплава предопределяется теплофизическими свойствами сплава и формы, условиями заполнения рабочих полостей формы расплавом, положением стенки отливки в пространстве во время заливки и пр. Поэтому процесс образования усадочной пористости следует рассматривать в контексте условий формирования каждой конкретной отливки, начиная с момента поступления расплава в форму.

Для относительно толстостенных отливок, при получении которых заполнение формы расплавом происходит, как правило, без возникновения твёрдой фазы в потоке расплава, характер затвердевания расплава в форме предопределяется преимущественно условиями теплоотвода от залитого расплава в стенки формы. При этом условии объёмного затвердевания сплава имеет вид [41]:

$$\frac{\Delta t_{кр}}{\delta \cdot (t_L - t_n)} \gg 1,$$

где  $t_n$  — температура поверхности затвердевающей отливки, °С.

При выполнении данного условия (при низкой интенсивности теплоотвода в форму от затвердевающей отливки) происходит объёмная кристаллизация расплава в форме с образованием равноосной макроструктуры, представленной на рис. 11.35,а.

Условие последовательного затвердевания расплава в форме имеет следующий вид:

$$\frac{\Delta t_{кр}}{\delta \cdot (t_L - t_n)} \ll 1.$$

При выполнении данного условия (при высокой интенсивности теплоотвода в форму от затвердевающей отливки) происходит последовательный рост твёрдой фазы в расплаве (со стороны стенок формы к тепловой оси сечения твёрдой фазы), а транскристаллитная макроструктура затвердевшей отливки отливается схематично представленный на рис. 11.35,в.

Из вышесказанного следует, что один и тот же расплав в различных условиях охлаждения может затвердевать по различным механизмам и, соответственно, иметь различную макроструктуру.

Несколько иначе обстоит дело с процессом затвердевания тонкостенных отливок, когда на ход затвердевания расплава в форме оказывают значительное влияние условия течения расплава в форме в процессе его заливки.

Процесс формирования макроструктуры отливок и усадочной пористости рассмотрим на примере тонкостенной отливки типа плиты, с использованием рис. 11.35.

Как было отмечено выше, течение расплава в узком щелевом канале формы, если температура формы ниже температуры расплава, как правило, сопровождается выделением твёрдой фазы в потоке расплава по одной из схем, представленных на рис. 11.35. На этом же рисунке представлены типовые виды распределения температуры в плоской стенке затвердевающей отливки (от центра 0 до её поверхности R) к моменту прекращения течения расплава в форме и соответствующие им схемы макроструктур получаемых отливок.

Затвердевание металла в потоке расплава, соответствующее схеме, приведенной на рис. 11.35,а, характерно для сплавов с широким интервалом кристаллизации. Результатом такого типа кристаллизации является образование равноосной макроструктуры в стенках отливки.

Образование равноосной макроструктуры в отливках происходит по следующему механизму. При заливке расплав поступает в полости формы с определённым перегревом над температурой ликвидус. Контактная с поверхностью формы и интенсивно нагревая её, поток расплава постепенно теряет теплоту перегрева. По-

этому после заполнения определённой части канала формы протяжённостью  $l$ , дальнейшее течение расплава сопровождается поглощением стенками формы теплоты кристаллизации пристеночных слоёв потока расплава и образованием в них твёрдой фазы.

С этого момента течение расплава сопровождается образованием в нём разобщённых кристаллов и их свободным перемещением в направлении движения потока. По мере продвижения расплава в канале формы происходит постепенное понижение температуры его головной части и накопление в ней образовавшихся дезориентированных кристаллов. По достижении определённой доли твёрдой фазы (кристаллов) в головной части потока расплава и понижении его температуры вязкость расплава в потоке увеличивается настолько, что его дальнейшее продвижение в полости формы под действием металлоstaticкого давления в стояке становится невозможным. В этот момент времени происходит остановка потока расплава.

Таким образом, в рассматриваемом случае (см. 11.35,а), в момент прекращения течения расплава в форме сплав находится в двухфазном (твёрдо-жидком или жидко-твёрдом) состоянии. При этом интенсивность теплоотвода от расплава в стенки формы, как и прежде, невелика, что является причиной низкого градиента температуры по сечению стенки затвердевающей отливки и, соответственно, в последующие периоды затвердевания приводит к практически одновременному появлению кристаллов затвердевшего сплава по всему сечению стенки отливки.

Поскольку усадочная пористость в отливках образуется в процессе затвердевания сплава и формируется в области его двухфазного состояния, то основным условием получения плотного металла в отливке является достаточность и непрерывность поступления расплава к фронту кристаллизации металла затвердевающей отливки.

Начальный период процесса затвердевания "широкоинтервальных" сплавов в условиях прекращения течения расплава в форме характеризуется продольным, в направлении от прибыли (вдоль оси 0-t, см. рис. 11.35), перемещением расплава и

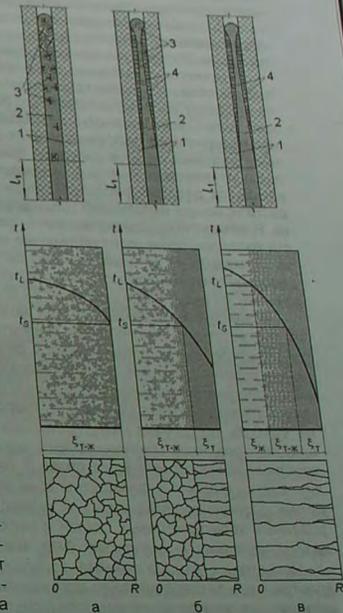


Рис. 11.35. Схемы выделения твёрдой фазы в потоке расплава, виды распределения температуры в стенке затвердевающей отливки и соответствующие им типы макроструктур отливок: 1 — стенки формы; 2 — расплав; 3 — кристаллы; 4 — корочка затвердевшего металла



Следует отметить, что в стенках отливки с макроструктурой смешанного типа при определённых условиях могут образовываться и слоистые микрорайоны. В области перехода от столбчатой к равноосной макроструктуре.

Распределение температуры в стенке отливки (от оси стенки 0 до её поверхности R) и транскристаллитная макроструктура, соответствующая схеме на рис. 11.35, в, характерны для чистых металлов и сплавов с узким температурным интервалом кристаллизации, затвердевающих в условиях средней и высокой интенсивности тепловода.

У сплавов с узким интервалом кристаллизации процесс образования твёрдой фазы по сечению стенки отливки проходит последовательно (последовательно затвердевание) от поверхности формы к её геометрической (тепловой) оси.

Как и в вышеописанных случаях, при заливке расплава с узким температурным интервалом кристаллизации движется в канале формы определённое время без образования твёрдой фазы, проходя расстояние  $l_1$  (см. рис. 11.35, в). После потери головной части потока расплава определённой доли теплоты перегрева начинается процесс пристеночного затвердевания расплава (рост корочки затвердевшего металла на стенках формы). Причём с удалением от места подвода затвердевшего расплава толщина затвердевшей корочки на стенках канала расплава увеличивается, в связи с чем температура расплава неуклонно понижается.

В определённый момент времени скорость движения головной части потока расплава становится настолько малой, а его вязкость настолько высокой, что течение расплава в канале прекращается.

Характер и интенсивность затвердевания расплава на стенках канала литевой формы зависит от соотношения удельных тепловых потоков от расплава к корке и от корки к форме. При этом, из числа технологических параметров, в равных условиях, определяющими является температура ( $t_{гек}$ ), скорость ( $W$ ) и длительность ( $\tau$ ) течения расплава через  $i$ -тое сечение канала формы.

В качестве примера, на рис. 11.38 представлены схемы наиболее характерных зависимостей изменения толщины корки в  $i$ -том сечении канала формы в процессе заливки и затвердевания расплава. В случае если  $t_{гек} \rightarrow t_L$  ( $t_L$  - температура плавления сплава или температура плавления чистого металла),  $W_i \rightarrow 0$  и  $\tau_i \rightarrow 0$ , то характер изменения толщины корки во времени (в стенке отливки толщиной  $\delta = 2R$ ) соответствует зависимости 1, представленной на рис. 11.38. То есть, зависимость 1 соответствует непрерывному росту корки расплава залитого в форму, практически, без перегрева.

С увеличением величины всех или хотя бы одного из вышеуказанных параметров заливки, скорость роста твёрдой корки металла в затвердевающей отливке уменьшается и, соответственно, увеличивается длительность затвердевания отливки, что соответствует зависимости 2 (см. рис. 11.38).

Заполнение формы расплавом при более высоких значениях параметров  $t_{гек}$ ,  $W_i$  и  $\tau_i$  приводит к тому, что в определённый момент времени  $t_2$ , величина удельного теплового потока от расплава к корке, движущегося при заливке формы через  $i$ -тое сечение её канала, становится равной величине удельного теплового по-

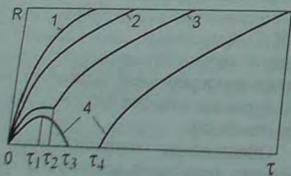


Рис. 11.38. Зависимость толщины корки затвердевшего расплава на стенке формы от времени

тока от корки в форму. В результате этого, рост корки в потоке расплава не только замедляется, но и останавливается. Если к этому моменту времени заливка формы завершена, то рост корки в  $i$ -том сечении канала (см. зависимость 3 на рис. 11.38) возобновляется, но со значительно меньшей скоростью, что обусловлено существенным повышением температуры формы в  $i$ -том сечении к моменту времени  $t_2$ .

Зависимость 4, представленная на рис. 11.38, соответствует случаю, когда значения параметров  $t_{гек} \gg t_L$ ,  $W_i \gg 0$  и  $\tau_i \gg 0$ . В этом случае, с момента начала формы происходит непрерывный рост первичной корки в стенках канала мента времени  $t_1$ . С момента времени  $t_1$  в рассматриваемом сечении канала формы величина удельного теплового потока от расплава к корке становится равной и большей величины удельного теплового потока от корки в форму. В результате этого за время  $t_1 - t_2$  течение расплава в канале происходит на фоне расплавления образовавшейся первичной корки металла. Если к моменту времени  $t_2$  процесс заполнения формы расплавом не завершён, то по окончании расплавления первичной корки, расплав контактирует непосредственно с поверхностью формы в  $i$ -том сечении, а непрерывный пристеночный рост вторичной корки затвердевающего расплава начинается по окончании его течения в канале (с момента времени  $t_2$ ).

Практика производства стальных отливок в многослойные керамические оболочковые формы (КО), изготовленные методом выплавляемых моделей, свидетельствует о том, что характер затвердевания расплава в термических узлах и стенках мелких отливок соответствует зависимости 2 представленной на рис. 11.38. В то же время, характер затвердевания расплава в тонких протяжённых стенках отливок соответствует зависимостям 3 и 4, представленным на рис. 11.38.

Зона двухфазного состояния металла представляет собой дендриты, строго ориентированные в направлении от поверхности отливки к её тепловому центру (оси). Причём доля твёрдой фазы у основания дендритов выше, чем у их вершин. Локализация микрорайонов расплава в междендритном пространстве, вызванная срастанием между собой ветвей дендритов, приводит к образованию между ними микропор.

До понижения температуры в осевой части стенки отливки до температуры ливидуса ( $t_L$ ) расплава от питающего элемента (питателя, прибыли) свободно перемещается вдоль стенки отливки (продольный массоперенос) и поступает в междендритное пространство твёрдо-жидкой зоны (поперечный массоперенос) по всей поверхности фронта кристаллизации. После достижения в центральной части стенки отливки температуры  $t_L$  в момент времени  $t_1$  фронты кристаллизации, продвигающиеся от противоположных поверхностей стенки отливки навстречу друг другу, смыкаются в осевой части стенки отливки, резко сокращая интенсивность продольного массопереноса.

С этого момента вся двухфазная область стенки отливки начинает испытывать дефицит расплава, причём тем больше, чем дальше от прибыли располагается сечение отливки. Таким образом, с момента времени  $t_1$  основным механизмом перемещения расплава в отливке является не свободное течение, а фильтрация. Причём если до смыкания продвигающихся навстречу друг другу фронтов кристаллизации длина наибольшего пути фильтрующегося расплава была равна ширине фронта кристаллизации (ширине двухфазной зоны), то с момента времени  $t_1$  длина наибольшего пути, который должен пройти расплав путём фильтрации, практически становится равным длине стенки отливки (от прибыли до рассматриваемого сечения отливки).

По мере понижения температуры в осевой части стенки отливки дефицит расплава, необходимый для питания двухфазной области, возрастает. При этом рас-

плав, находящийся в междендритном пространстве, начинает испытывать значительные растягивающие усилия, вызванные разницей потребности в расплаве об-  
ластью двухфазного состояния отливки и её пропускной способностью.

В результате этого в момент времени  $\tau_2$  происходит нарушение сплошности об-  
тока расплава в междендритном пространстве вдоль осевой части отливки, то есть  
в расплаве образуются разрывы потока жидкого металла. В образовавшемся по-  
лости преимущественно из расплава диффундируют растворённые в нём газы. С  
этого момента все сечения отливки, лежащие за местом разрыва потока жидкого  
металла со стороны, противоположной прибыли, оказываются не питаемыми  
плавом. Именно в этих частях отливки и образуется осевая засоренная мак-  
ропористость, которая соответствует типу 2,б или типу 2,с, схематично предст-  
авленным на рис. 11.33.

Сплошная рыхлота в стенках отливок (см. рис. 11.33,с,7) — явление относительно  
редкое и образуется только в результате прекращения питания стенки отливки в  
период, когда температура в её центральной части ещё не понизилась до темпера-  
туры ликвидус.

Практика получения отливок показывает, что наиболее часто, по данным рент-  
ген-контроля, в тонких стенках отливок наблюдается локальная рыхлота — значи-  
тельное локальное отклонение величины усадочной пористости от её среднего  
значения. Локальная рыхлота располагается на осевой плоскости стенки отливки и  
характерна для отливок, полученных из сплавов с узким и средним интервалом  
кристаллизации. Как правило, этот вид пористости на рентгеновских снимках тонких  
стенок отливки выглядит в виде вытянутых пятен или пятен, близких компактной  
форме, внутри которых иногда просматриваются контуры ветвей дендритов. При  
этом величина таких рыхлот может быть весьма значительной и зани-  
мать площадь на рентгеновском снимке стенки отливки до 1...2 см<sup>2</sup> и более.

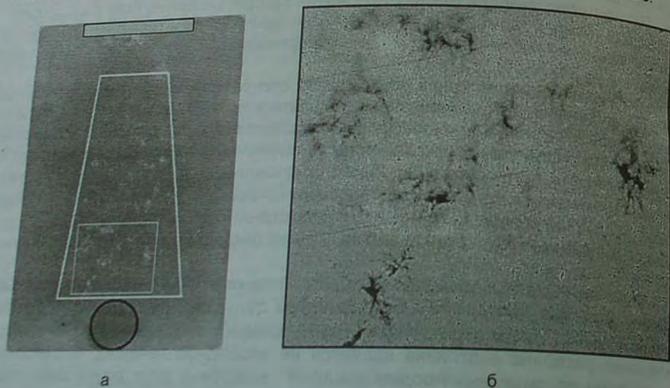


Рис. 11.39. Позитив рентгеновского снимка плоской отливки (4×100×150 мм)  
из стали 08Х14Н7МЛ (а) и негатив его фрагмента (б), выделенного на рис. 11.39,а  
белым прямоугольником

На рис. 11.39,а представлен позитив рентгенограммы вертикально залитой от-  
ливки "Пластина" (габаритные размеры отливки 4×100×150 мм) из стали

08Х14Н7МЛ, полученной в КО с начальной температурой 970°С. На рентгенограм-  
ме место установки питателя на отливке (внизу) очерчено окружностью. В верхней  
части прямоугольником обозначено место установки верхнего литника.

На позитиве рентгенограммы область засорённого расположения локаль-  
ных рыхлот очерчена белой трапецией. Угосток позитива рентгенограммы, выде-  
лота (в виде негатива) представлен на рис. 11.39,а, в большем мас-  
штабе (в виде негатива) представлен на рис. 11.39,б. На рентгеновском снимке (не-  
гативе) пятно с нечёткими контурами выглядит как светлое (на позитиве) и чёрное (на нега-  
тиве) пятно с нечёткими контурами.

Из представленного на рис. 11.39,а позитива рентгенограммы видно, что наи-  
более плотный металл (во фронтальной плоскости отливки) наблюдается вдоль  
стенок отливки. При этом ширина зоны плотного металла вдоль торцов отливки  
составляет около трех — пяти толщин стенки отливки, а вся остальная часть отлив-  
ки поражена локальными рыхлотами.

Причиной образования локальной рыхлоты в тонких стенках отливки является  
фронтальное искажение линейности фронта кристаллизации [236].

Механизм образования локальных рыхлот в плоской стенке отливки рассмот-  
рим используя рис. 11.40, на котором схематично представлены этапы фронталь-  
ного продвижения (роста) твёрдой фазы в затвердевающей плоской отливке и обра-  
зование локальных рыхлот, реконструированные по результатам изучения обра-  
зованных отливок, полученных методом декантации жидкого остатка из затверде-  
вающих отливок (размеры отливок пластин — 4...6×100×150 мм) в различные пе-  
риоды времени с момента окончания заливки КО.

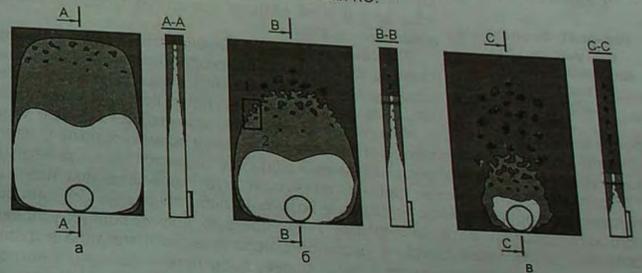


Рис. 11.40. Схема этапов роста твёрдой фазы во фронтальной плоскости  
затвердевающей плоской отливки

- - область отсутствия твёрдой корочки металла
- - область, где  $\xi_T = R$
- - область, у которой толщина корочки металла  $\xi_T < R$
- - локальные рыхлоты

Согласно рис. 11.40,а через 3...5 с после окончания заливки КО твёрдая корочка  
под питателем и вплоть до половины высоты отливки не образовалась. При этом  
в верхней части полости КО твёрдая корочка металла образовалась, но её толщина  
меньше, чем половина толщины стенки отливки. На всю толщину отливки расплав  
затвердел лишь в углах отливки и в её верхней части. При этом в верхней части  
затвердевшей области отливки, над поверхностью фронта кристаллизации, наблю-  
даются возвышающиеся над фронтом кристаллизации вершины отдельных денд-  
ритов.

В последующие периоды затвердевания эти дендриты, непрерывно увеличиваясь в размерах, сростаются между собой (см. рис. 11.40,б), образуя перед фронтальной линией фронта затвердевания непроницаемые для расплава барьеры и способствуя локализации отдельных объемов расплава друг от друга и, соответственно, образованию в этих местах локальных рыхлот.

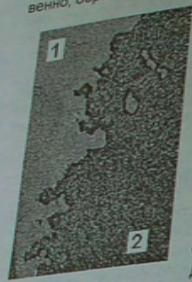


Рис. 11.41. Фронтальный вид участка фронта кристаллизации плоской отливки из стали 08X14H7ML

На рис. 11.41 представлен фронтальный вид участка фронта затвердевания, вырезанного из декантированного образца плоской отливки толщиной 4 мм (после механической шлифовки слоя затвердевшего металла с поверхности отливки толщиной 2 мм), схема металла представлена на рис. 11.40,б (место вырезки образца см. рис. 11.40,б очерчено прямоугольником).

На рис. 11.40,г виден участок отливки, где, к моменту декантации расплава из КО, завершился процесс затвердевания (1) и участок с незавершенной кристаллизацией (2), на поверхности которого видны вершины отдельных дендритов, а на рис. 11.40,в представлена схема областей затвердевшего металла в процессе затвердевания отливки. Из рис. 11.40 следует, что, несмотря на очевидность последовательности движения фронта кристаллизации в теле отливки (от торцов отливки к питателю), характер затвердевания расплава во фронтальной плоскости не изменяется и, по-прежнему в теле отливки продолжают образовываться локальные рыхлоты.

Явление нарушения линейности фронта затвердевания во фронтальной плоскости отливки, приводящее к образованию в ней локальной макропористости и рыхлот, назвали инволюцией (Involution – завиток, лат.). Инволюция фронта кристаллизации наиболее характерна для тонких стенок отливок с плоскостями поверхности. С увеличением кривизны поверхности стенки данный эффект становится менее заметным. Обработка статистических данных показывает, что уменьшение образования локальных рыхлот возможно либо обеспечить условия образования затвердевания металла в форме, либо, при всех прочих равных условиях, либо увеличить толщину стенки до 5 мм и более, либо путём изменения наклона наибольшей плоскости тонкой стенки относительно вертикальной оси, как это, например, представлено на рис. 11.42.

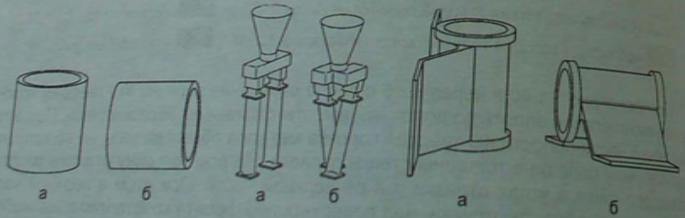


Рис. 11.42. Схемы нереконструируемого (а) и рекомендуемого (б) положения отливок в пространстве при заливке

Теоретическая оценка величины усадочной пористости в отливках, полученных по "традиционной" технологии изготовления литья. Причиной возникновения усадочных дефектов в отливках является нарушение сплошности потока расплава из питателя или питателя к фронту кристаллизации расплава в отливке.

По мнению И.Б. Каманина и А.И. Вейника, образование усадочной пористости в двухфазной области существования сплава в затвердевающей области каналов в отливке, исходя из параболического закона распределения температуры по сечению стенки отливки в процессе её затвердевания и охлаждения, ширину пористой зоны в плоской стенке отливки (Λ) и величину усадочной пористости (Π) А.И. Вейник рассчитывает по формулам:

$$\Lambda = R \cdot \left[ B_{\Pi} \cdot (1 - \Theta) \cdot \left( 1 + \frac{n}{Bi_0} \right) \right]^{\frac{1}{n}}; \quad (11.26)$$

$$\Pi = \gamma \cdot \left[ B_{\Pi} \cdot (1 - \Theta) \cdot \left( 1 + \frac{n}{Bi_0} \right) \right]^{\frac{1}{n}}; \quad (11.27)$$

$$B_{\Pi} = \frac{(1 - \varphi_a)^{\frac{1}{m}} - (1 - \varphi_n)^{\frac{1}{m}}}{(1 - \Theta) \cdot (1 - \varphi_a)^{\frac{1}{m}} + \Theta}; \quad 1 - \Theta = \frac{T_L - T_S}{T_L - T_2}; \quad \Theta = 1 - \frac{T_L - T_S}{T_L - T_2}; \quad Bi_0 = \frac{\alpha_0 \cdot R}{\lambda_1}$$

где  $n$  – показатель степени параболы, описывающей температурное поле стенки отливки;  $m$  – коэффициент ( $m=3$ );  $R$  – половина толщины стенки отливки,  $\gamma$  – пористый коэффициент;  $\Psi_{\Pi}$  – относительное количество твёрдой фазы на границе прекращения фильтрации расплава в двухфазной области;  $T_L$  и  $T_S$  – температура ликвидуса и солидуса сплава соответственно;  $T_2$  – начальная температура формы;  $K, \alpha_0$  – коэффициенты теплоотдачи от отливки к форме, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности твёрдого металла, Вт/(м·К).

Анализ формул (11.26) и (11.27) показывает, что, при всех прочих равных условиях, величины  $\Pi$  и  $\Lambda$  в стенке отливки уменьшаются с увеличением начальной температуры формы и температуры перегрева заливаемого расплава, то есть с увеличением длительности затвердевания отливки [26; 153; 284 и др.].

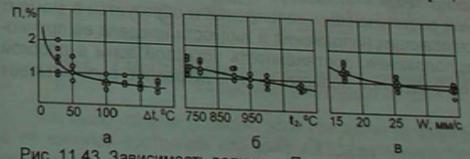


Рис. 11.43. Зависимость величины Π в плоской отливке от температуры перегрева течения расплава в КО при t<sub>2</sub>=950°C и W=26 мм/с (а) от начальной температуры КО при Δt=50°C и W=26 мм/с (б) и скорости течения расплава в канале формы при t<sub>2</sub>=950°C и Δt=50°C (в)

На рис. 11.43 представлены зависимости величины усадочной пористости (Π) плоских отливок из стали 08X14H7ML (толщина стенки 4 мм) от температуры перегрева расплава при его течении в КО (Δt), начальной температуры кварцевой КО (t<sub>2</sub>) и скорости течения

расплава в канале КО, полученные автором.  
 Б.Б. Гуляев и Л.М. Постнов считают причиной образования пористости в отливках наличие растворённых в расплаве газов. Исходя из этого предположения, величину  $\Lambda$  в плоской отливке Л.М. Постнов рассчитывает по формуле [211]:

$$\Lambda = \sqrt{\frac{3 \cdot \eta \cdot k^2 \cdot \beta \cdot l^2}{2 \cdot R \cdot (P_0 + \rho_1 \cdot l_{\text{П}} - P_{\text{Г}})}} \quad (11.26)$$

где  $l$  - протяжённость отливки;  $R$  - половина толщины стенки отливки;  $k$  - коэффициент затвердевания;  $P_0$  - давление в полости усадочной раковины прибыли;  $P_{\text{Г}}$  - давление газов в порах отливки;  $\eta$  - динамическая вязкость расплава;  $\beta$  - коэффициент объёмной усадки сплава;  $l_{\text{П}}$  - расстояние от оси плоской отливки до конца области залегания усадочной раковины в прибыли;  $\rho_1$  - плотность расплава.

Согласно формуле (11.28) ширина пористой зоны в стенке отливки уменьшается с увеличением толщины стенки отливки, со снижением скорости затвердевания расплава в форме и его динамической вязкости, а также со снижением величин давления газов в усадочных порах отливки (со снижением количества газов, растворённых в отливке).

По мнению А.А. Рыжикова, прекращение питания затвердевающей отливки от прибыли наступает в результате более раннего затвердевания металла под прибылью. Причину этого А.А. Рыжиков видит в том, что расплав, поступающий из прибыли в затвердевающую отливку, имеет более высокую температуру кристаллизации, чем расплав, находящийся в стенке отливки. Различие температур кристаллизации А.А. Рыжиков связывает с различной степенью развития температурных процессов, сопровождающих затвердевание расплава в отливке и прибыли.

В.А. Денисов и С.В. Костенецкий [70] причину образования усадочных дефектов в стенках отливок видят в газонасыщенности реальных расплавов, в связи с чем образование усадочной пористости в реальных отливках носит газосусадочный характер и только при условии полного отсутствия растворённых в расплаве газов процесс образования усадочной пористости в отливке может носить усадочный характер.

Согласно теории М.К. Флемингса и В.А. Журавлёва, образование усадочной пористости носит газосусадочный характер и происходит в области двухфазного состояния затвердевающего сплава в результате разрыва жидкости в фильтрационных каналах, с последующей диффузией растворённых в металле газов в образующиеся полости (газосусадочные поры).

Разрыв жидкости, согласно теории Флемингса-Журавлёва, происходит в результате возникновения в ней растягивающих напряжений и образуется в момент превышения величины растягивающих напряжений в жидкости предела её прочности. Исходя из данного предположения, протяжённость пористой зоны в плоской стенке отливки и величину её усадочной пористости В.А. Журавлёв рассчитывает по формулам:

$$\Lambda = \chi \cdot \frac{1 - \left( \frac{1 - \varphi_{\text{П}}}{1 - \varphi_{\text{В}}} \right)^{\frac{1}{m_0}}}{R} \quad (11.29)$$

или

$$\Lambda = \chi \cdot \frac{1 - \left( \frac{\Pi}{1 - \varphi_{\text{В}}} \right)^{\frac{1}{m_0}}}{R} \quad (11.30)$$

$$\Pi = \beta \cdot (1 - \varphi_{\text{В}}) \cdot \left[ 1 + \frac{\gamma \cdot (P_0 - P_2) \cdot 20 \cdot (1 - \varphi_{\text{В}})^{0.67}}{U \cdot \eta \cdot \beta} \right]^{0.6} \quad (11.31)$$

где  $\chi$  - граница раздела фаз;  $\gamma$  - коэффициент объёмного расширения сплава,  $K^1$ ;  $P_0$  - внешнее давление на расплав в процессе его затвердевания;  $P_2$  - динамическая вязкость расплава;  $U$  - линейная скорость продвижения фронта кристаллизации в отливке;  $m_0$  - коэффициент ( $m_0=3$ );  $\beta$  - коэффициент объёмной усадки сплава;  $P_2$  - парциальное давление газов растворённых в сплаве,  $P_2$ .

Анализ формулы (11.31) показывает, что, при всех прочих равных условиях, величина усадочной пористости отливки понижается с уменьшением парциального давления газов, растворённых в жидком металле и увеличением газового давления над затвердевающим расплавом, а также с уменьшением скорости продвижения фронта кристаллизации (затвердевания) расплава в стенке отливки, с понижением динамической вязкости расплава и величины коэффициента объёмной усадки сплава при его затвердевании.

Тимофеев Г.И. образование межзёрненных пустот в отливках связывает с низким газосодержанием сплавов. Образование пор при низком содержании газов в металле и отсутствии его диффузии в образующуюся полость (пору) сопровождается высоким разрежением, которое превышает сдвиговые напряжения твёрдого жидкого состояния сплава и вызывают перемещение близлежащих кристаллов с образованием по границам зёрен трещин и пустот.

Анализ формул (11.26)...(11.31) показывает, что все рассмотренные модели в целом достоверно описывают известные экспериментальные данные по влиянию тех или иных параметров на образование пористости в отливках. Однако ни одна из моделей не учитывает влияния теплокинетической ситуации, складывающейся в процессе течения расплава в форме на величину усадочной пористости в стенках отливки, поскольку при постановке задачи авторы предполагают мгновенную заливку формы расплавом.

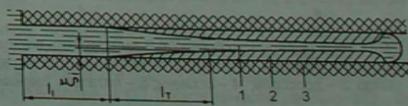


Рис. 11.44. Схема пристеночного затвердевания металла в потоке расплава: 1 - расплав; 2 - твёрдый металл; 3 - форма

Как было отмечено выше, если при заливке формы скорость течения расплава в её каналах постоянна или изменяется незначительно, то, например, в условиях пристеночного затвердевания расплава на стенках КО (формы) в процессе её заливки формируется твёрдый слой металла, непрерывно увеличивающий свою толщину в направлении течения расплава (см. рис. 11.44). При этом, согласно исследованиям, проведенным автором, зависимость толщины корки затвердевшего

металла на стенке формы в этот период времени может быть описана уравнением вида:

$$\xi_i = k_i \sqrt{t_i}$$

где  $\xi_i$  — толщина затвердевшей корки металла в форме в  $i$ -том сечении,  $k_i$  — правочный коэффициент,  $t_i$  — расстояние между  $i$ -тым сечением и сечением ливки, в котором толщина корочки  $\xi \approx 0$  (см. рис. 11.44), м.  
 Вышеописанная схема образования твердой фазы в отливке предопределяет соответственно, и характер распределения, и величину усадочной пористости стенок отливки.

На рис. 11.45, а представлен вид модельного блока, а на рис. 11.45, б... г — зависимости величины усадочной пористости плоских отливок (150X100 мм) из стали 08X14H7МЛ с толщиной стенки  $\delta=2; 4$  и 6 мм (последовательное затвердевание отливки в процессе течения расплава в КО с  $t_2 = 950 \pm 15^\circ\text{C}$ ).

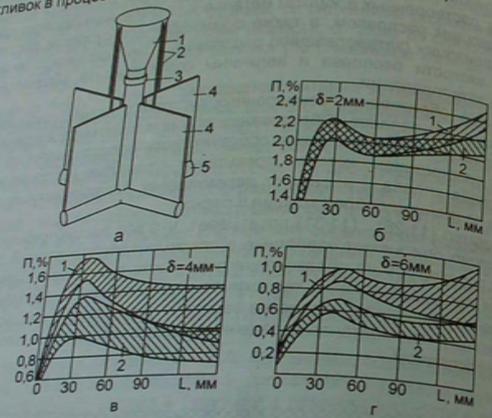


Рис. 11.45. Схема модельного блока (а) и зависимость величины усадочной пористости в отливках (пластинах) от расстояния от питателя (б...г): 1 — ЛВ; 2 — выпор; 3 — дроссель; 4 — отливки; 5 — питатель шелевого типа

На рис. 11.45, б... г цифрой 1 обозначены поля рассеяния значений величины усадочной пористости для отливок, полученных в КО, незаформованных в опорный наполнитель и залитых на воздухе. Цифрой 2 на рис. 11.45, б... г отмечены поля рассеяния величины усадочной пористости отливок, полученных в термостатированных КО. Зависимость средней величины усадочной пористости в полученных отливках от их толщины представлена на рис. 11.46.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 11.45, показывает, что величина усадочной пористости в отливках, полученных в рассматриваемых условиях, не постоянна по длине отливки и уменьшается с увеличением толщины стенки отливки. При этом средняя величина усадочной пористости в отливках, полученных в КО,

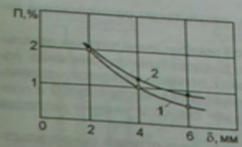


Рис. 11.46. Зависимость пористости от толщины стенки отливки: 1 — отливки получены в термостатированные КО; 2 — отливки получены в не термостатированные КО

заформованных в термостат, ниже, чем у отливок, полученных в незаформованных КО, и с увеличением толщины стенки различие между величинами усадочной пористости у таких отливок возрастает (см. рис. 11.46).

В реальных условиях заполнения форм расплавом всегда имеет место непостоянство скорости течения расплава в её рабочих полостях, что вызвано, во-первых, конфигурационными особенностями отливки, во-вторых, неравномерностью поступления расплава в КО (форму) в условиях использования незамкнутой ЛПС.

В качестве примера на рис. 11.47 представлен разрез блока отливки "Патрубок" и графики изменения скорости подъёма уровня расплава в её тонких стенках (толщина тонких стенок отливки ~3,8 мм, высота отливки в КО — 52 кг.

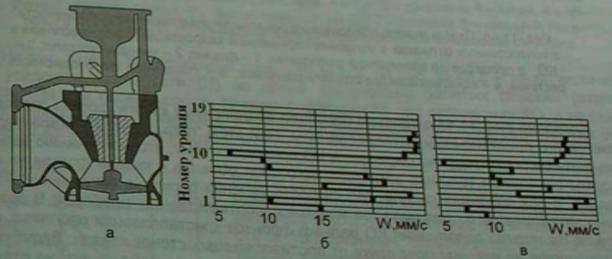


Рис. 11.47. Блок отливки "Патрубок" (а) и графики изменения скорости подъёма уровня расплава в её тонких стенках при заполнении КО расплавом с удельной скоростью  $Q=4,15 \text{ кг/с}$  (б) и  $Q=2,45 \text{ кг/с}$  (в)

Анализ графиков, представленных на рис. 11.47, показывает, что в процессе заливки КО отливки "Патрубок" скорость подъёма уровня расплава в её тонких стенках изменяется в достаточно широких пределах независимо от удельной скорости поступления расплава в КО (длительности заливки КО). Причём изменение скорости течения расплава в КО носит "пульсирующий" характер, что, несомненно, оказывает влияние на процесс формирования и величину усадочной пористости в тонких стенках отливки.

"Пульсирующий" характер изменения скорости течения расплава в рабочих полостях КО (формы) несущественно сказывается на качестве отливок с относительно толстыми стенками ( $\delta > 6 \text{ мм}$ ) либо в случае течения расплава по каналам формы без его пристеночного затвердевания (например, при высокоом перегреве расплава и высокой начальной температуре формы). В то же время это обстоятельство во многом предопределяет качество тонкостенных отливок по усадочной пористости, в

особенности, если качество отливок оценивать по результатам рентгеновской флюорографии, а также испытаниями на герметичность.

По мнению авторов работы [185], первопричиной прекращения питания отдельных объемов расплава в осевой части отливки и, следовательно, появления локальной усадочной макропористости в тонких стенках отливки, является неравномерность толщины корочки твердого металла, образующейся на стенках КО в процессе её заполнения расплавом в условиях "пульсации" скорости течения расплава в КО.

Статистический анализ качества тонких стенок фасонных отливок свидетельствует о том, что усадочная пористость в таких стенках, выявляемая рентгеновским контролем, образуется преимущественно в местах, наиболее удаленных от питающих элементов ЛПС и характеризующихся значительным изменением скорости течения расплава во время заливки формы.

Для пояснения обратимся к схеме, представленной на рис. 11.48.

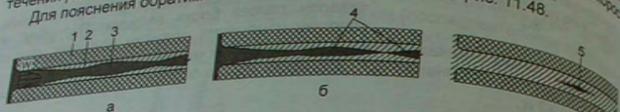


Рис. 11.48. Схема этапов образования локальной усадочной макропористости в тонкостенных отливках в условиях переменной скорости движения расплава в КО, в процессе её заполнения расплавом: 1 – форма; 2 – твердый металл; 3 – расплав; 4 – локализованные объемы расплава; 5 – локальная макропористость

Согласно рис. 11.48, а течение расплава по щелевому каналу формы дается его пристеночным затвердеванием. При этом "пульсирующий" характер изменения скорости течения расплава в КО приводит к тому, что к окончанию заливки формы расплавом толщина затвердевшего слоя металла в канале формы не одинакова. В тех сечениях канала, где скорость течения расплава была выше, не одинакова толщина затвердевшего слоя металла меньше и, соответственно, наоборот. В результате по окончании заполнения КО рельеф фронтов кристаллизации расплава, практически идентичен рельефу поверхности слоя металла, затвердевшего на стенках КО к окончанию процесса её заливки (см. рис. 11.48, б). Неравномерность толщины затвердевших слоев металла в различных сечениях канала формы в определенный момент времени приводит к локализации отдельных объемов расплава друг от друга. Впоследствии именно на этих участках и образуется локальная усадочная макропористость, и именно на этих участках толщина "литейной" корочки – наименьшая (см. рис. 11.48, в).

В работе [185] исследования влияния характера изменения скорости течения расплава в КО (форме) проводили на плоских отливках с размерами  $150 \times 100$  мм и толщиной стенки  $\delta=2$ ,  $\delta=4$  и  $\delta=6$  мм. Схема модельного блока, использованного для изготовления экспериментальных отливок, представлена на рис. 11.49, а.

Особенность модельного блока, представленного на рис. 11.49, а, состоит в том, что переменный характер изменения скорости течения расплава при заполнении канала формы в области отливки достигается за счёт выполнения параллельно стояку элемента переменной сечения (обратного стояка), а ЛВ со стояком сообщается через дроссель. В исследованиях использовали КО, упакованные в термостат и предварительно нагретые до  $950 \pm 10^\circ\text{C}$ .

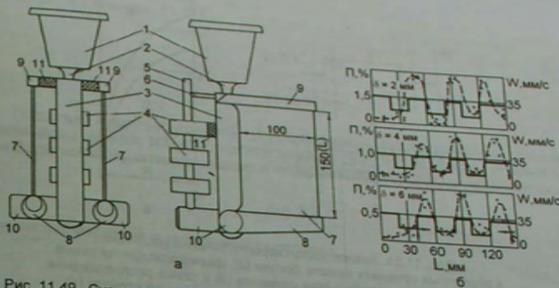


Рис. 11.49. Схема модельного блока (а) и зависимость величины усадочной пористости плоских отливок из стали 08Х14Н7МЛ, а также скорости течения расплава в рабочей полости КО (б) от расстояния от питателя: 1 – ЛВ; 2 – дроссель; 3 – стояк; 4 – обратный стояк; 5 – выпор; 6 – горизонтальный выпор; 7 – отливка; 8 – щелевой питатель; 9 – прибыль; 10 – литниковый ход; 11 – керамический крепежный стержень

На рис. 11.49, б представлена зависимость (см. на рис. 11.49, а – точки) величины усадочной пористости (П) по длине вертикально залитых пластин (сталь 08Х14Н7МЛ), а также скорость течения расплава (W) при заполнении КО, а на рис. 11.50 представлены зависимости средней и максимальной пористости данных отливок, в зависимости от толщины их стенки.

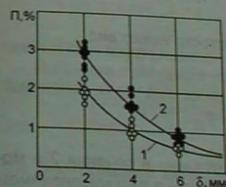


Рис. 11.50. Зависимость пористости от толщины стенки отливки: 1 – средняя пористость; 2 – максимальная пористость (макропористости)

Из анализа хода зависимостей, представленных на рис. 11.49, следует, что в условиях "пульсирующего" характера изменения скорости течения расплава в форме изменение величины пористости в тонкостенных отливках прямо пропорционально изменению скорости течения расплава в форме. При этом максимальная величина усадочной макропористости тем выше, чем меньше толщина стенки отливки, что видно из зависимостей, представленных на рис. 11.50. Кроме того, при толщине стенки отливки  $\delta \geq 8$  мм пульсационный характер течения расплава в форме практически не приводит к появлению в стенке отливки локальной макропористости.

Формализованная схема, иллюстрирующая процесс образования пористости по вышеописанному механизму, представлена на рис. 11.51. На рис. 11.51, а представлена зависимость изменения скорости течения расплава (W) в различных сечениях канала формы (на оси I рис. 11.51, а сечения обозначены цифрами 1, 2, 3), в процессе его заполнения, на рис. 11.51, б представлена формализованная схема сечения стенки отливки в момент окончания затвердевания расплава в её сечениях 1 и 3, а на рис. 11.51, в представлена схема распределения температуры в данных сечениях отливки.

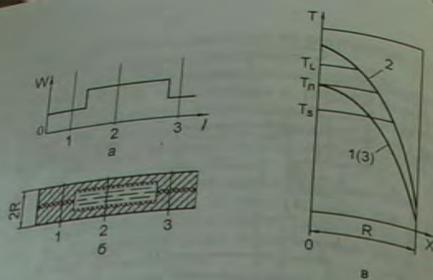


Рис. 11.51. Зависимость скорости течения расплава в различных сечениях канала формы (а), формализованная схема затвердевания расплава в этих сечениях (б) и схема распределения температуры в смежных сечениях затвердевающей отливки (в)

Исходя из принятых на рис. 11.51 обозначений, можно сказать, что, если линия фронта кристаллизации в сечении отливки 2, где  $W_2 > W_1$  и  $W_2 > W_3$ , осуществляется через сечение 1 (3), то для сечений 1 и 3 условие образования усадочной пористости имеет вид [185]:

$$\Psi(0, \tau_2^*) = \Psi_B; \quad (11.35)$$

$$\Psi(\Lambda_n, \tau_2^*) = \Psi_n. \quad (11.36)$$

Для сечения 2 условие образования усадочной пористости имеет вид:

$$\Psi(0, \tau_2^*) = \begin{cases} 0, & \text{если } T_n'' > T_L \\ \Psi_{BL}, & \text{если } T_n'' (T_n'' \leq T_L); \end{cases} \quad \Psi(\Lambda_n, \tau_2^*) = \Psi_n$$

где  $T_n''$  – температура металла в тепловой оси стенки отливки в сечении 2 в момент времени  $\tau_2^*$ ;  $\Psi$  – относительное количество твёрдой фазы в рассматриваемом сечении отливки;  $\Psi_B$ ,  $\Psi_n$  – относительное количество твёрдой фазы в двухфазной зоне в момент начала и окончания процесса фильтрации расплава, соответственно;  $\Lambda_n$  – относительная протяжённость пористой зоны отливки;  $\tau_2^*$  – время прекращения фильтрации расплава в сечении 1 (3);  $\Psi_{BL}$  – относительное количество твёрдой фазы в интервале температур от  $(T_L$  до  $T_B)$ ;  $T_L$  и  $T_B$  – температура ликвидус и температура на границе выливаемости расплава в двухфазной зоне соответственно.

Для чистых металлов и эвтектических сплавов (при отсутствии зоны двухфазного состояния) условие образования усадочной пористости в сечении 1(3) имеет вид (см. рис. 11.51):

$$\Psi(0, \tau_2^*) = 1, \quad (11.37)$$

для сечения 2 (см. рис. 11.51),

$$\Psi(0, \tau_2^*) = \Psi_B; \quad (11.36)$$

$$\Psi(\Lambda_n, \tau_2^*) = \Psi_n. \quad (11.37)$$

Поскольку в момент времени  $\tau_2^*$  прекращается фильтрационное течение расплава через сечения 1(3), то относительную ширину пористой зоны отливки в сечении 2 для сплавов, затвердевающих в интервале температур, определяют как

$$\Lambda_n = \chi_n'(\tau_2^*); \quad (11.38)$$

для чистых металлов и эвтектических сплавов:

$$\Lambda_n = (\chi_n'')^*(\tau_2^*), \quad (11.39)$$

где  $\chi_n''$  и  $(\chi_n'')^*$  – определяет границу питания фронта кристаллизации в сечении 2 для сплавов, затвердевающих в интервале температур, и чистых металлов (эвтектических сплавов) соответственно.

Отсюда величину максимальной локальной усадочной макропористости для отливок из сплавов, кристаллизующихся в интервале температур, определяют.

$$P_{\max} = N(\Lambda_n). \quad (11.40)$$

Для отливок из чистых металлов и эвтектических сплавов:

$$P_{\max}^* = N^*(\Lambda_n), \quad (11.41)$$

где  $N$  и  $N^*$  – коэффициент пропорциональности.

Величина локальной усадочной макропористости в тонкой стенке отливки, изготовленной из сплава, кристаллизующегося в интервале температур, составит:

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{ср}} + P_{\max}, \quad (11.42)$$

где  $P_{\text{ср}}$  – средняя величина пористости отливки, образующаяся в условиях заполнения канала формы расплавом при постоянной скорости течения расплава в канале.

В работе [223] величину  $P_{\max}$  рассчитывают по формуле (%):

$$P_{\max} = 100 N \frac{2 \cdot \Delta \xi}{\delta} \left( \frac{\rho_l - \rho_s}{\rho_l} \right); \quad (11.43)$$

$$\Delta \xi = \delta \cdot \frac{(t_n - t_2)}{(t_{\text{ЛВ}} - t_n)} \cdot \left( \frac{1}{Nu_i} - \frac{1}{Nu_{i+1}} \right) \cdot \frac{\lambda_i}{\lambda_{i+1}} \cdot \frac{1}{n}; \quad t_n = 0,5(t + t_s)$$

где  $\Delta \xi$  – разница толщин корки затвердевшего металла в сечениях 2 и 1 (3), м;  $Nu_i$  и  $Nu_{i+1}$  – критерий Нуссельта в  $i$ -том и  $i+1$ -вом сечении стенки отливки соответ-

венно (описание критериев подобия см. в форме;  $n$  — показатель степени параболы распределения температурного поля в форме;  $t_1$  и  $t_2$  — температура ликвидус и солидус сплава соответственно,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_2$  — начальная температура формы;  $t_1$  — температура течения расплава в форме,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — плотность твёрдого и жидкого металла вблизи температуры солидус и ликвидус соответственно,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — коэффициент теплопроводности твёрдого и жидкого металла вблизи температуры солидус и ликвидус соответственно,  $\text{Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$ ).

Критерий (число) Нуссельта характеризует теплообмен на границе раздела жидкости и может быть рассчитан по формуле:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot \delta}{\lambda_1}$$

где, в данном случае,  $\alpha$  — коэффициент теплообмена на поверхности соприкосновения жидкого и твёрдого расплава в стенку формы через слой затвердевшего металла, можно записать:

$$Nu = f(Re, Pr),$$

где  $Re$  и  $Pr$  — число Рейнольдса и Прандтля соответственно.

Для сталей, заливаемых в КО, изготовленные на основе ГРЭС, пылевидного кварца и кварцевого песка при температуре КО  $t_2 = 950 \pm 30^{\circ}\text{C}$ , величину критерия Нуссельта, в первом приближении, можно рассчитать по уравнению [223]:

$$Nu = 0,053 \sqrt{Re} \cdot \sqrt[4]{Pr} \quad (11.44)$$

$$Re = \frac{\bar{W} \cdot \delta}{2 \cdot \nu}, \quad Pr = \frac{\nu}{a_1}$$

где  $\bar{W}$  — средняя скорость течения расплава в рассматриваемом сечении шелевого канала формы, м/с;  $\nu$  — кинематическая вязкость расплава при температуре течения в форме (для сталей конструкционных нелегированных —  $\nu \approx 0,75 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , для сталей высоколегированных хромоникелевых —  $\nu \approx 0,78 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ).

Анализ уравнения (11.43) показывает, что, при всех прочих равных условиях, уменьшению величины локальной макропористости в тонких стенках отливки способствует повышение температуры течения расплава в КО, повышение начальной температуры КО, повышение скорости течения расплава в форме и уменьшение разности скоростей течения расплава в смежных сечениях тонкой стенки отливки.

В качестве примера, на рис. 11.52 представлена зависимость  $P_{\text{общ}} = f(\delta)$  для вертикально-залитых плоских отливок из стали 08Х14Н7МЛ рассчитанная по вышеприведенным формулам. Для расчёта были приняты следующие значения параметров:  $W = 0,02 \text{ м/с}$ ,  $W_{\text{нр}} = 0,04 \text{ м/с}$ ,  $\nu = 0,78 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $t_{\text{теч}} = 1520^{\circ}\text{C}$ ,  $t_1 = 1480^{\circ}\text{C}$ ,  $t_2 = 1440^{\circ}\text{C}$ ,  $t_2 = 950^{\circ}\text{C}$ ,  $a_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\lambda_1 = 18 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$ ,  $\lambda_2 = 14 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$ ,  $\rho_1 = 7100 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_2 = 7000 \text{ кг/м}^3$ ,  $N = 0,09$ .

Анализ зависимости, представленной на рис. 11.52, и вышеприведенных формул показывает, что величина локальной макропористости, при всех прочих равных

условиях, возрастает с уменьшением толщины стенки отливки, начальной температуры формы (КО), температуры перегрева расплава и скорости течения расплава в форме, а также с увеличением соотношения  $\frac{W_{\text{нр}}}{W_1}$ .

Из вышеизложенного следует, что в отливках, том числе и тонкостенных фасонных отливках, используя те или иные технологические приёмы, можно понизить величину усадочной пористости до определённого уровня, однако добиться абсолютной плотности металла невозможно. Поэтому в тонкостенных отливках ответственного назначения, где протяжённость стенок превышает их толщину в десятки и сотни раз, а также в отливках, изготавливаемых из сплавов с широким температурным интервалом кристаллизации, снижения величины усадочной расплава в КО (форме) [71; 73; 209 и др.].

По данным [71], применительно к плоским отливкам из никелевых сплавов, направленных затвердеванием расплава в форме возможно обеспечить получение отливок с величиной усадочной пористости  $P \leq 0,1\%$  при условии создания вдоль тела КО (в направлении от торца отливки к её прибыли) определённого градиента температуры в момент окончания заливки формы расплавом. Для определения этого температурного градиента можно воспользоваться зависимостью, представленной на рис. 11.53.

На рис. 11.53 представлена зависимость минимально допустимого температурного градиента по высоте КО (от торца отливки к прибыли) от её наибольшей начальной температуры, обеспечивающего получение отливок из никелевых сплавов с величиной усадочной пористости 0,1%.

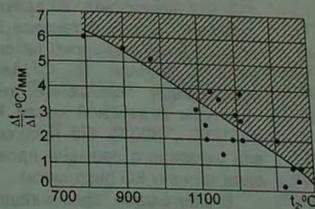


Рис. 11.53. Зависимость температурного градиента по высоте КО от её начальной температуры, обеспечивающего получение отливки из никелевого сплава с величиной усадочной пористости  $P = 0,1\%$  [71]

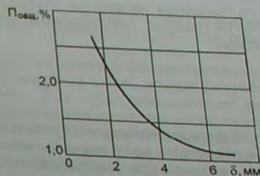


Рис. 11.52. Зависимость величины пористости в отливках из стали 08Х14Н7МЛ от толщины стенки отливки

Например, если начальная температура КО в области прибыли отливки составляет  $t_{2\text{н}} = 1250^{\circ}\text{C}$ , то для получения отливки протяжённостью  $l = 300 \text{ мм}$  с величиной усадочной пористости в ней менее 0,1% величина минимального градиента начальной температуры в КО (см. рис. 11.53) должна составлять  $\frac{\Delta t}{\Delta l} = 2,0 \text{ град/мм}$ . То есть донная часть КО до заливки должна иметь температуру не более:

$$t_{2\text{д}} = t_{2\text{н}} - \frac{\Delta t}{\Delta l} \cdot l = 1250 - 2 \cdot 300 = 650^{\circ}\text{C}.$$

В то же время, например, если начальная температура КО в области прибыли отливки составляет  $t_{2\text{н}} = 1350^{\circ}\text{C}$ , то для получения отливки протяжённостью  $l = 300 \text{ мм}$  с величиной усадочной пористости в ней не более 0,1% величина минимально-

го градиента начальной температуры в КО (см. рис. 11.53) должна составлять  $G=1,0$  град/мм. То есть донная часть КО до заливки должна иметь температуру не более:

$$t_{2n} = t_{2n} - \frac{\Delta t}{\Delta l} \cdot l = 1350 - 1 \cdot 300 = 1050^\circ\text{C}.$$

В случае необходимости получения отливки с ещё меньшим уровнем усадочной пористости величину начального температурного градиента по высоте КО следует увеличить (см. заштрихованное поле на рис. 11.53).

Для создания положительного прокалённой КО в опоку на водоохлаждаемый холодильник с последующей засыпкой в свободное пространство опоки экзотермической смеси, либо КО формируют в разнофракционный опорный наполнитель, при этом постоянно заполняя опоку наполнителем с частицами различной фракции, начиная от больших фракций и заканчивая меньшими фракциями и т.п.

Авторы работы [71] для создания положительного температурного градиента по высоте КО предлагают использовать индукционный нагрев КО. Для этого предварительно прокалённую и охлаждённую до комнатной температуры КО формируют в опорный наполнитель по схеме, представленной на рис. 11.54, а. Технологами КО используют кольцеобразные графитовые нагревательные элементы, размеры которых постепено убывают в направлении от прибыли к донной части КО. Нагрев графитовых элементов и, соответственно, различных частей КО до различной температуры осуществляется за счёт включения индуктора высокой частоты (при использовании стальных нагревательных элементов) или промышленной (при использовании определённого температурного градиента по высоте КО автор использовал приспособление, схема которого представлена на рис. 11.54, б. Технология получения отливок (турбинных лопаток) в приспособлении, представленном на рис. 11.54, б, заключается в том, что предварительно прокалённую и охлаждённую до комнатной температуры КО устанавливают в приспособление. После установки КО подают электроэнергию на спирали в течение 15...20 мин, обеспечивая повышение температуры в верхней части КО до 1250...1300°C. По прошествии указанного времени проводят заливку КО расплавом.

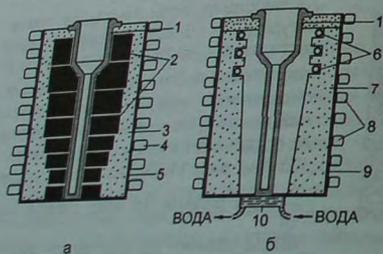


Рис. 11.54. Схемы устройств (приспособлений) для создания положительного температурного градиента по высоте КО к моменту её заливки: 1 – КО; 2 – нагревательные элементы; 3 – опорный наполнитель; 4 – индуктор; 5 – лист асбеста; 6 – спирали электросопротивления; 7 – футеровка; 8 – система охлаждения; 9 – стальная кожух; 10 – водоохлаждаемый стальной холодильник

В настоящее время подготовку КО к заливке данными способами в промышленных условиях серийного производства отливок не применяют. В этом смысле вышеописанные способы получения отливок и полученные экспериментальные результаты имеют, по большей части, теоретическую ценность, по сути, являясь раз-

новидностью способов направленной кристаллизации расплава в форме и предопределяя основные требования к технологическим параметрам других способов направленной кристаллизации отливок.

**Образование микропористости в отливках в условиях последовательного или направленного затвердевания.** Как было отмечено выше, микропористость (пористость) образуется как между осями первого и высшего порядка каждого расщепленного дендрита, так и в междендритном пространстве затвердевающего сплава. При этом величина образующейся в отливке пористости (занимаемый в сплаве объём) зависит от природы сплава отливки, то есть от диаграммы состояния сплава, на что впервые указал А.А. Бочвар в 1940 г. в своих работах по литейным сплавам. Последующие многочисленные работы по данному вопросу, посвящённые исследованию связи между величиной пористости и протяжённости двухфазной зоны в затвердевающей отливке величина пористости в ней возрастает.

Дендритный рост твёрдой фазы в затвердевающем расплаве – следствие неравновесия в жидком и твёрдом металле (основе сплава). Отношение концентрации данного элемента (легирующего или примеси) в твёрдой фазе сплава ( $C_S$ ) к концентрации в жидкой фазе сплава ( $C_L$ ) называют коэффициентом

$$k = \frac{C_S}{C_L}.$$

Если  $k < 1$ , то данный элемент плохо растворим в твёрдой фазе затвердевающего сплава и во время кристаллизации содержание данного элемента в расплаве перед фронтом кристаллизации повышается.

Если  $k > 1$ , то данный элемент хорошо растворим в твёрдой фазе затвердевающего сплава и во время кристаллизации содержание данного элемента в расплаве перед фронтом кристаллизации понижается.

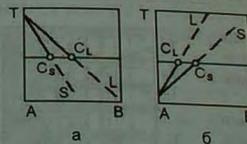


Рис. 11.55. Схемы линий ликвидуса и солидуса для бинарных сплавов ( $a - k < 1$ ;  $b - k > 1$ )

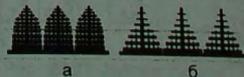


Рис. 11.56. Схемы формы дендритов в сплавах с  $k < 1$  (а) и  $k > 1$  (б)

В любом случае изменение химического состава расплава перед фронтом кристаллизации приводит к определённому концентрационному переохлаждению на фронте кристаллизации и переходу из ячеистой к дендритной форме роста кристаллов в затвердевающем сплаве [33; 312 и др.].

Величина коэффициента распределения предопределяет вид диаграммы фазового состояния сплава. В качестве примера на рис. 11.55 представлены схемы линий ликвидуса и солидуса для бинарных сплавов при  $k < 1$  (нисходящие сплавы) и при  $k > 1$  (восходящие сплавы).

Каждому виду сплава, в соответствии с величиной  $k$ , соответствует определённая форма растущих в нём при кристаллизации дендритов (см. рис. 11.56). В соответствии с формой дендритов, каждому сплаву соответствует определённое содержание и характер распределения твёрдой фазы в области его двухфазного состояния, которые,

в свою очередь, предопределяют величину изменяющейся в сплаве пористости. Все промышленные литейные сплавы представляют собой многокомпонентные системы, для большинства исследований затвердевания сплавов [41; 98 и др.] менее существующие методики исследования их состояния. Тем не менее позволяют определить характер распределения и относительное содержание твердой фазы ( $\Psi$ ) в интервале температур затвердевания многокомпонентных сплавов. В качестве примера на рис. 11.57 представлены зависимости относительного содержания твердой фазы в интервале температур затвердевания некоторых сплавов [16; 41; 98], а в табл. 11.5 приведены значения  $\Psi$ , вычисленные по изобразенным, представленным на рис. 11.57.

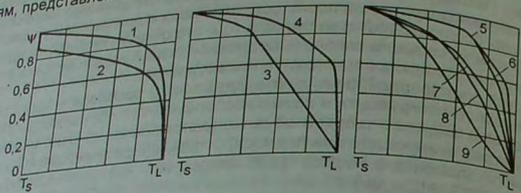


Рис. 11.57. Зависимости изменения доли твердой фазы от температуры в интервале кристаллизации некоторых сплавов: 1 – АЛ8 [41]; 2 – БрО10Ц2 [16]; 3 – ЖС-ЗДК, ВЖЛ-14; 4 – 12Х2НВФЛ; 5 – 10Х16НЗЛ; 6 – 08Х14Н7МЛ; 7 – 09Х16Н4БЛ; 8 – 10Х18Н9ТЛ, 07Х18Н9Л; 9 – 04Х13Н5М5К9Л

Таблица 11.5  
Относительное содержание твердой фазы ( $\Psi$ ) в двухфазной области существования некоторых промышленных сплавов

Сплав	$\Psi$	Сплав	$\Psi$	Сплав	$\Psi$
АЛ8	0,84	08Х14Н7МЛ	0,84	09Х16Н4БЛ	0,71
БрО10Ц2	0,69	12Х2НВФЛ	0,83	10Х18Н9ТЛ, 07Х18Н9Л	0,69
ЖС-ЗДК, ВЖЛ-14	0,61	10Х16НЗЛ	0,87	04Х13Н5М5К9Л	0,55

Рассмотрим влияние величины  $\Psi$  на усадочную пористость в отливках из сплавов типа твердых растворов, затвердевающих в условиях последовательной (направленной) кристаллизации расплава в форме.

На рис. 11.58 представлена схема распределения температуры по сечению плоской, симметрично затвердевающей отливки толщиной  $\delta=2R$  из сплава типа твердого раствора, для случая последовательного затвердевания в момент ( $\tau_1$ ) достижения в тепловой оси стенки отливки температуры ликвидус. В момент времени  $\tau_1$  в отливке можно выделить область твердого металла ( $\xi_T$ ) и область двухфазного состояния сплава шириной  $R-\xi_T$ . При этом, согласно схеме, приведенной на рис. 11.58, протяженность зоны микроскопических перемещений расплава в междендритном пространстве затвердевающей отливки составляет величину -  $\xi_{\text{пс}}$ , протяженность зоны макроscopicких перемещений -  $R-\xi_{\text{пс}}-\xi_T$ . При этом температура  $T_B$  определяет границу начала, а тем-

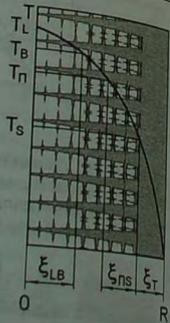


Рис. 11.58. Распределение температуры по сечению стенки затвердевающей отливки

пература  $T_n$  - границу окончания процесса фильтрации расплава в двухфазной зоне.

Поскольку  $T_B \approx T_n$  (для "нисходящих" сплавов допустимо принять  $T_B = T_n$ ), то в момент времени  $\tau_1$  в стенке отливки имеет место продольно-поперечный массоперенос расплава в затвердевающей области, можно сказать, что продольный осевой 0-T (см. рис. 11.58) в зоне шириной  $R-\xi_{\text{пс}}$  в поперечном направлении осуществляется вдоль теплового оси 0-R, в зоне шириной  $R-\xi_{\text{пс}}-\xi_T$ .

В момент времени ( $\tau_2$ ) достижения в тепловой оси отливки температуры  $T_B$  существует прекращение питания отливки от прибыли, в рассматриваемом сечении. Поэтому величина усадочной пористости, в рассматриваемом сечении отливки, предопределяется количеством жидкой фазы в междендритном пространстве в зоне твердого металла ( $\xi_T$ ).

На основании вышеизложенного, для не разрушенной структуры двухфазной зоны, величину усадочной пористости (в %) в стенке отливки можно рассчитать по формуле [242]:

$$\Pi = \frac{100 \cdot \beta \cdot [(1 - \Psi_{\text{пс}}) (\xi_T + \xi_{\text{пс}}) + (1 - \Psi) (R - \xi_T) - (1 - \Psi_{\text{пс}}) \xi_{\text{пс}}]}{R} \quad (11.45)$$

где  $\beta$  - коэффициент объемной усадки сплава при его переходе из жидкого в твердое состояние;  $\Psi$  - относительное количество твердой фазы в области двухфазной фазы в зоне  $\xi_{\text{пс}}$  и  $\xi_{\text{ЛВ}}$ , соответственно.

Как следует из формулы (11.45), величина усадочной пористости в отливке зависит не только от величины коэффициента объемной усадки в отливке при его переходе из жидкого в твердое состояние, но и от вида диаграммы фазового состояния сплава.

Зависимость величины  $\Pi$  от вида диаграммы фазового состояния сплава объясняется тем, что от вида диаграммы фазового состояния сплава, при всех прочих равных условиях, зависят величины  $\Psi$ ,  $\Psi_{\text{пс}}$ ,  $\Psi_{\text{ЛВ}}$ ,  $\xi_{\text{пс}}$  и  $\xi_{\text{ЛВ}}$  (см. рис. 11.59).

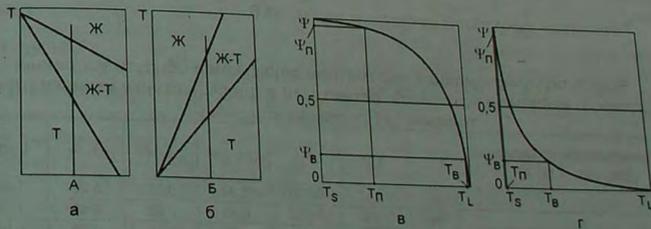


Рис. 11.59. Фрагменты диаграммы фазового состояния нисходящего (а) и восходящего (б) псевдобинарного сплава, зависимость относительного количества твердой фазы в зоне двухфазного состояния сплава "А" (а) и сплава "Б" (а) от температуры

На рис. 1.59 представлены фрагменты диаграмм фазового состояния бинарного нисходящего (см. рис. 11.59.а) и восходящего (см. рис. 11.59.б) сплавов, имеющих одинаковый температурный интервал кристаллизации, а на рис. 11.59.а и рис. 11.59.г представлены зависимости  $\Psi=f(T)$  для условных сплавов "А" и "Б". Для теоретической оценки влияния относительного количества твердой фазы в области двухфазного состояния сплава затвердевающей плоской отливки на величину усадочной пористости ( $\Pi$ ) в её стенке и толщину литейной корочки на величину зависимости, представленные на рис. 11.60.а.

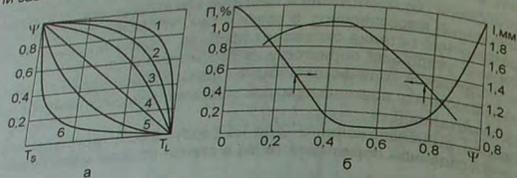


Рис. 11.60. Зависимости относительного количества твердой фазы в области двухфазного состояния сплава от температуры (а) и зависимость величины усадочной пористости и толщины литейной корочки в стенке отливки от величины  $\Psi$  (б)

Расчёт значений величины  $\Pi$  проводили по формуле (11.45), приняв следующие значения величин  $\beta = 0,032$ ,  $\delta = 0,004$  м,  $\xi_T = 0,0005$  м,  $\Psi_n = 0,95$ , приняв следующий закон распределения температуры по ширине двухфазной зоны затвердевающей стенки отливки. В этом случае, определение значений величин  $\Psi$ ,  $\Psi_{ns}$  и  $\Psi_{LB}$  осуществляли методом планиметрирования, а определение величин  $\xi_{ns}$  и  $\xi_{LB}$  путём измерения соответствующих отрезков на оси 0-R.

Поскольку микропористость отливок, в отличие от их макропористости и рычлот, не влияет на герметичность литых деталей, в связи с разобщённостью микропор между собой, то величину  $l = \xi_n$  рассчитывали по формуле:

$$l = \xi_n = \xi_T + \xi_{LB} + \xi_{ns} \quad (11.46)$$

Результаты вычислений приведены в табл. 11.6.

Таблица 11.6  
Результаты определения параметров двухфазной области условных сплавов, величины усадочной пористости в плоской стенке отливки ( $\Pi$ ) и толщины её литейной корочки ( $l$ )

Условный номер сплава (см. рис. 1.60.а)	$\Psi$	$\Psi_{ns}$	$\Psi_{LB}$	$\xi_{ns}$ , мм	$\xi_{LB}$ , мм	$\Pi$ , %	$l$ , мм
1	0,887	0,987	0,500	0,84	0,03	0,26	1,37
2	0,786	0,984	0,500	0,52	0,06	0,48	1,08
3	0,673	0,970	0,500	0,30	0,14	0,70	0,94
4	0,500	0,911	0,500	0,07	0,30	0,87	0,87
5	0,297	0,950	0,350	0,03	0,71	1,24	1,24
6	0,135	0,985	0,337	0,01	1,21	1,72	1,72

Зависимости  $\Pi = f(\Psi)$  и  $l = f(\Psi)$  для сплавов с одинаковым интервалом кристаллизации рассчитаны по формулам (11.45) и (11.46) и представлены на рис. 11.60.б. Анализ хода зависимостей, представленных на рис. 11.60.б, показывает, что обе зависимости носят экстремальный характер с минимальным значением  $\Pi$  при  $\Psi = 0,48 \dots 0,65$  и максимальным значением  $l$  при  $\Psi = 0,35 \dots 0,50$ .

Поскольку подавляющее число сплавов относится к нисходящим ( $\Psi > 0,5$ ), то можно констатировать, что для получения герметичных отливок ( $\Psi > 0,5$ ), то согласно уравнению (11.45)  $\Pi = 0$  в случае, если  $T_n = T_3$  и  $\xi_T = R$ . В промышленных условиях получения отливок, выполнение условия  $T_n = T_3$  сложно реализуемо, по-прежнему промышленные отливки, выполненные с высокой чистотой затвердевают с дендритной формой кристаллов. В то же время условие  $\xi_T = R$  реализуется в дендритной формуле (%):

$$\Pi = 100 \cdot \beta \cdot (1 - \Psi_n) \quad (11.47)$$

Из вышеизложенного следует, что, в промышленных условиях производства отливок, получить отливку абсолютно лиственную усадочных пор – невозможно, а для получения отливок с минимальной пористостью, требуются сплавы с определённым комплексом свойств и параметров, к числу которых относится и относительное количество твердой фазы в области двухфазного состояния существования сплава -  $\Psi$ .

### 11.3. Направленная кристаллизация отливок

Способом направленной кристаллизации получают отливки с направленной столбчатой, монокристаллической и гранулярной структурой.

Направленная кристаллизация отливки – это способ (способы) обеспечивающие течение всего времени затвердевания отливки кристаллизации расплава в форме движения фронта кристаллизации расплава в форме в течение всего времени затвердевания отливки достигают либо за счёт преимущественно однонаправленного редельённого градиента давлений, либо за счёт создания в расплаве опно-закристаллизованных отливок преимущественно используют способы, основанные на создании направленного теплоотода от расплава в форме.

Принцип кристаллизации отливок, основанный на направленном теплоотводе от расплава в форме, рассмотрим на схеме, представленной на рис. 11.61, где обозначены:  $T_0$  – температура металла,  $T_{KO}$  – температура КО,  $T_L$  и  $T_S$  – температура ликвидус и солидус сплава соответственно. На рис. 11.61 представлены изображения фазового состояния сплава отливки в различные периоды времени (направленное затвердевание металла отливки осуществляется в направлении снизу вверх) и распределение температуры по высоте отливки протяжённости  $l$ , а также распределение температуры по высоте КО в условиях непрерывного теплоотода от её донной части.

Согласно рис. 11.61,а в начальный период времени (непосредственно после заполнения КО расплавом) температура КО и расплава, находящегося в КО, равны и превышают температуру ликвидус сплава. С момента начала теплоотода от нижней торцевой части отливки температура расплава в донной части КО понижа-

ется до температуры ликвидус в результате чего на дне КО появляются затвердевшие сплавы. Образовавшиеся кристаллы, по сути, являются затравками, из которых в дальнейшем осуществляется преимущественный рост кристаллов в направлении наибольшего температурного градиента в отливке (снизу вверх).



Рис. 11.61. Схема распределения температуры по высоте направленно-затвердевающей отливки в различные периоды времени: 1 – жидкий металл (расплава); 2 – КО; 3 – область двухфазного состояния сплава; 4 – твердый металл

Дальнейшее понижение температуры донной части КО приводит к формированию определенного температурного градиента по высоте отливки, способствующего затвердевшего расплава в донной части КО и появлению области двухфазного состояния сплава протяженностью  $\xi_{LS}$  (см. рис. 11.61,б.)

В последующее время затвердевания отливки фронт кристаллизации продолжает перемещаться вдоль рабочей полости КО, увеличивая толщину слоя затвердевшего металла со стороны её донной части. Вместе с этим увеличивается и пропорционально температурного градиента по высоте отливки (см. рис. 11.61,в). Понижение интенсивности теплопередачи от расплава в донную, непрерывно охлаждаемую часть КО. То есть, чем больше толщина слоя затвердевшего в КО расплава, тем ниже интенсивность теплопередачи через него (от расплава в КО расплава, даемую часть КО), тем меньше величина градиента температуры по высоте охлаждаемой части КО, соответственно, шире область двухфазного состояния сплава.

Последний период затвердевания расплава в КО (см. рис. 11.61,г) характеризуется окончанием процесса кристаллизации расплава в КО.

Рассматривая вопрос о направленной кристаллизации расплава в форме, следует отметить, что в начальный период кристаллизации сплава в КО кристаллики (кристаллические затравки), образующиеся в её донной части, имеют определенную кристаллографическую и пространственную ориентацию по отношению к направлению наибольшего температурного градиента в расплаве. Именно эти два фактора являются причиной конкурентного роста между кристаллами, растущими из данных затравок. При этом наибольшей скоростью роста обладают кристаллы, затравки которых изначально были ориентированы параллельно направлению наибольшего температурного градиента, созданного в расплаве для его кристаллизации в КО, а также кристаллы, обращенные к фронту кристаллизации границами (кристаллографическими направлениями), характеризующимися наибольшим коэффициентом теплопроводности.

В результате конкурентного роста количество кристаллов на единицу площади поверхности поперечного среза направленно-закристаллизованной отливки, в на-

правлении тепловода от затвердевающего сплава, монотонно уменьшается, а макроструктура направленно-закристаллизованной отливки приобретает вид, схематично представленный на рис. 11.62, где направление продвижения фронта кристаллизации расплава при затвердевании отливки обозначено стрелкой.

Рассматривая упрощенную схему направленной кристаллизации отливок, следует отметить, что в данном процессе одним из важнейших технологических показателей сплава (см. рис. 11.61,б):

$$G_{LS} = \frac{T_L - T_S}{\xi_{LS}} = \frac{\Delta T_{LS}}{\xi_{LS}} \quad (11.48)$$

Чем больше величина градиента температуры ( $G_{LS}$ ), тем уже зона двухфазного состояния затвердевающего сплава, тем, соответственно, ниже микропористость и выше механические и эксплуатационные свойства структурных составляющих сплава, для каждого сплава, при изменении его химического состава в пределах марки, величина  $\Delta T_{LS}$  практически постоянна, то одной из основных задач направленной кристаллизации отливок является создание условий, обеспечивающих направленную кристаллизацию отливки в условиях высокого градиента температуры, то есть за счет уменьшения ширины (протяженности) зоны двухфазного состояния сплава в процессе его кристаллизации.

Не менее важным параметром, определяющим качество направленно-закристаллизованной отливки, является степень искривления поверхности фронта кристаллизации отливки, зачастую приводящая к несовершенству её структуры. В качестве примера на рис. 11.63,а представлен "идеальный" рельеф фронта кристаллизации отливки прямоугольного сечения.

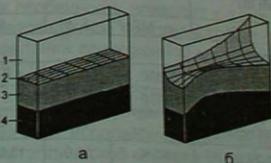


Рис. 11.63. Виды рельефов поверхности фронта кристаллизации отливки: 1 – расплав; 2 – поверхность фронта кристаллизации; 3 – зона двухфазного состояния сплава; 4 – твердый металл



Рис. 11.62. Макроструктура направленно-закристаллизованной отливки

Причиной "искривления" рельефа поверхности фронта кристаллизации отливки являются конфигурационные особенности самой отливки, низкий градиент температуры по высоте отливки, низкая интенсивность тепловода от залитой КО в процессе кристаллизации отливки и пр. При всех прочих равных условиях, для "выравнивания" рельефа фронта кристаллизации следует использовать КО с более тонкими стенками, изготавливать КО из материалов с более высокой теплопроводностью и низкой теплоемкостью, увеличить градиент температуры по высоте отливки.

Отливки с направленно-столбчатой и монокристаллической макроструктурой обладают явно выраженной анизотропией свойств, что позволяет значительно расширить рабочие пределы (температуру, нагрузки и пр.) использования литых деталей.

Поэтому направленная кристаллизация отливок, наряду с повышением степени легирования существующих и разработкой новых сплавов, является одним из важнейших направлений повышения жаропрочности сплавов, повышения плотности металла отливок, их герметичности, магнитных свойств и пр. [74; 90; 176 и др.]

В частности, направленная кристаллизация бронзы  $\text{BrO}10\text{Ц}2$ , отливки из которой характеризуются "традиционно" равноосной макроструктурой (температурный интервал кристаллизации бронзы  $\text{BrO}10\text{Ц}2 - 150^\circ\text{C}$ ) и низкой герметичностью, позволяет не только значительно увеличить плотность сплава, но и его механические свойства, о чём свидетельствуют данные, приведенные в табл. 11.7.

Таблица 11.7  
Свойства бронзы  $\text{BrO}10\text{Ц}2$  с различной макроструктурой [249]

Макроструктура сплава	Направление приложения нагрузки при испытаниях	Свойства сплава при $20^\circ\text{C}$		
		$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	ак, МДж/м <sup>2</sup>
Равноосная	Вдоль кристаллов	286-306	9-10	2,5-4,7
	Поперёк кристаллов	367-378	40-46	13-15
Столбчатая	Вдоль кристаллов	326-347	24-26	5-6
	Поперёк кристаллов			

Способы направленной кристаллизации нашли особенно широкое применение для изготовления турбинных лопаток из жаропрочных сплавов на никелевой основе. Дело в том, что условия работы турбинных лопаток сопряжены с их высокотемпературной деформацией и разрушением, которое начинается по межкристаллитным границам, расположенным в теле лопатки перпендикулярно оси действующих напряжений [28]. В турбинной лопатке с направленно-столбчатой и монокристаллической макроструктурой поперечные межкристаллитные границы отсутствуют, что позволяет существенно повысить её надёжность и долговечность.

В качестве примера в табл. 11.8 приведены свойства сплава ЖС-6У с направленной структурой [217] в зависимости от направления приложенных нагрузок к направленно закристаллизованной отливке.

Таблица 11.8  
Свойства сплава ЖС-6У с направленно-столбчатой макроструктурой

Направление приложенных нагрузок	Свойства					
	при $975^\circ\text{C}$ ( $\sigma_B=260$ МПа)			при $20^\circ\text{C}$		
	$\tau$ , ч	$\delta$ , %	$\varphi$ , %	$\sigma$ , МПа	$\delta$ , %	$\varphi$ , %
Крупнстолбчатая макроструктура						
Продольное	64	18,0	27,0	890	3,6	4,8
Поперечное	34	4,0	4,0	870	2,8	3,5
Тонкостолбчатая макроструктура						
Продольное	31	10,0	21,0	1040	10,0	13,0
Поперечное	12	1,4	2,7	1030	9,0	14,0

Следует отметить, что в турбинных лопатках с монокристаллической макроструктурой вообще отсутствуют какие-либо межкристаллические границы, поскольку монокристаллическая отливка состоит из одного кристалла (дендрита).

Для сравнения влияния типа макроструктуры литой детали на её свойства в табл. 11.9 приведены сравнительные данные о жаропрочности сплавов ЖС-6У и ЖС-6Ф с равноосной, направленно-столбчатой и монокристаллической макроструктурой [176].

Таблица 11.9  
Жаропрочность сплавов ЖС-6У и ЖС-6Ф с равноосной, направленно-столбчатой и монокристаллической макроструктурой

Макроструктура отливки	Марка сплава	Кратковременная прочность*			$\sigma_{-1}$ , $2 \cdot 10^4$ , МПа*	Длительная прочность			
		$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\varphi$ , %		$\sigma_{40}$ при $975^\circ\text{C}$ , МПа	$\delta$ , %	Температура, $^\circ\text{C}$ время/100 ч, МПа	
Равноосная	ЖС-6У	850-950 700-750	3-5 2-4	4-6 3-5	170-200	230	3-5	900 1000	240 100
	ЖС-6Ф	900-1000 820-920	5-7 4-5	6-8 4-8	210 290	240	5-8	900 1000	330 115
Направленно-столбчатая	ЖС-6У	800-900 700-750	4-6 3-5	5-7 4-6	-	250	5-10	-	-
	ЖС-6Ф	750-900 700-800	6-13 5-10	7-15 8-12	200 300-320	260	6-12	800 900 1000	430 185 100
Монокристаллическая	ЖС-6У	900-1000 850-900	5-9 14-16	6-10 15-18	-	285	6-10	-	-
	ЖС-6Ф	850-950	6-8	7-9	200 340	275	8-15	1000	120

Примечание. \* - в числителе указаны значения при  $20^\circ\text{C}$ , в знаменателе - при  $900^\circ\text{C}$ .

Рассматривая вопрос о монокристаллических литых деталях (отливках) следует отметить их особенность связанную с различием плотности упаковки атомов в монокристалле в его различных кристаллографических плоскостях. Дело в том, что такая особенность приводит к тому, что монокристаллические литые детали, имеющие различное кристаллографическое направление своих монокристаллов в направлении приложенной к детали нагрузке, будут обладать различной прочностью [78; 176 и др.].

Поэтому в монокристаллической отливке повышения её свойств достигают не только за счёт устранения в теле отливки каких-либо межкристаллитных границ, но и за счёт использования оптимальной кристаллографической ориентации в монокристаллической отливке (литой детали) по отношению к направлению наибольших напряжений, действующих на литую деталь в процессе её эксплуатации.

В качестве примера на рис. 11.64 представлена пространственная структура ГЦК-кристалла, а также схемы некоторых плоскостей и направлений в нём, из которых следует, что не все плоскости, которые можно мысленно провести через узлы рассматриваемой кристаллической решётки, имеют одинаковую плотность "заселения" атомами. Из числа возможных кристаллографических направлений наибольшую плотность атомов имеет октаэдрическая плоскость [111]. То есть монокристаллическая литая деталь, имеющая ориентацию [111] по направлению наибольших растягивающих напряжений, действующих на неё при эксплуатации, будет обладать наибольшей прочностью.



Рис. 11.64. Плоскости и направления в кристаллической решётке (ГЦК)

В частности, сплавы с монокристаллической макроструктурой на никелевой основе, кристаллическое строение которых имеет ГЦК-решётку, характеризуются наибольшей прочностью и жаропрочностью в интервале рабочих температур (900...1000°C) именно в кристаллографическом направлении [111], о чём свидетельствуют данные, приведенные в табл. 11.10 [78] и табл. 11.11 [35].

Время до разрушения сплава ЖС-6Ф с монокристаллической макроструктурой в кристаллографических направлениях [001] и [111]

Таблица 11.10

Температура испытания сплава, °С	Приложенная нагрузка ( $\sigma_B$ ), МПа	Время до разрушения сплава, ч	
		[001]	[111]
975	270	46	130
1100	120	48	160

Таблица 11.11

**Характеристики монокристаллов из никелевого сплава ЖС-6 с различными кристаллографическими ориентациями**

Показатели	Значения для кристаллографической ориентации			
	[001]	[111]	[112]	[011]
$\sigma_B$ , МПа	900-1000	1150-1200	1000-1100	750-800
$\delta_5$ , %	8-10	4-5	7-8	15-20
$\sigma_{40}^{975}$ , МПа	270-280	290-310	280-290	260-270
$\sigma_{100}^{1100}$ , МПа	100-110	120-130	-	-
$E_{20}$ , МПа	132000	278000	230000	220000
$E_{600}$ , МПа	98000	214000	172000	161000

Применительно к нагруженным литым деталям, выбирая то или иное кристаллографическое направление роста будущей монокристаллической отливки, следует обратить внимание на модуль упругости (E) монокристаллов, поскольку величина модуля упругости во многом предопределяет величину термических напряжений, возникающих в литой детали при её эксплуатации [306].

То есть чем выше модуль упругости, тем выше термические напряжения, возникающие в детали в процессе её эксплуатации. Следовательно, несмотря на высокие прочностные характеристики монокристаллов с ориентацией [111], литые детали с такой ориентацией будут менее термостойки по сравнению с монокристаллическими литыми деталями отличной кристаллографической ориентации.

Таким образом, выбор кристаллографической ориентации кристалла монокристаллической литой детали зависит от условий её эксплуатации и конструкции. Например, если для детали наиболее важными показателями являются прочность и отличия является кристаллографическое направление для монокристаллической и то направление [001], если большая пластичность – то направление [111], если термостойкости и необходимости получения монокристаллических литых деталей с относительно высоким комплексным уровнем всех показателей целесообразным может быть кристаллографическая ориентация [112].

Следует отметить, что наименьшие технологические трудности связаны с кричением монокристаллических отливок, имеющих кристаллографическую ориентацию [001]. Наибольшие трудности возникают при получении монокристаллической отливки с ориентацией [111], поскольку данное направление роста кристалла реализуется в условиях крайне слабого переохлаждения, что, из числа всех известных кристаллографических ориентаций, требует обеспечения минимальной скорости роста кристалла.

То есть, помимо прочностных характеристик, кристаллографическое направление предопределяет ещё и скорость роста твердой фазы монокристаллической отливки в процессе её изготовления. При всех прочих равных условиях затвердевательного роста кристаллов – направления, в которых наблюдается предпочтительная скорость роста кристаллов при кристаллизации расплава. К числу таких направлений относятся [221]:

- кристаллографическое направление [100] – для металлов и сплавов с гранецентрированной, объемноцентрированной кубической кристаллической решёткой и
- кристаллографическое направление [1010] – для металлов и сплавов с гексагональной плотнопакетной кристаллической решёткой;

Вопрос о скорости роста твердой фазы при изготовлении монокристаллических отливок – немаловажен, поскольку данный параметр во многом предопределяет способ и длительность направленной кристаллизации расплава в форме, то есть методом направленной кристаллизации, используемой для получения отливки.

В настоящее время существует достаточно большое количество способов направленной кристаллизации отливок, отличающихся друг от друга способом нагревания и поддержания температуры заливки расплава, способом охлаждения нагревательной КО и т.п. В работе [99] способы направленной кристаллизации отливок классифицированы по следующим признакам.

1. По способу нагрева и поддержания температуры КО с расплавом:
  - использование экзотермических смесей;
  - индукционный нагрев с помощью графитовой гильзы-приёмника;
  - использование нагревателя сопротивления;
  - прямой индукционный нагрев.
2. По способу охлаждения затвердевающей отливки:
  - радиационный;
  - конвективный;
  - за счёт теплопроводности;
  - смешанный;
  - обдув газом.
3. По способу экранирования зоны нагрева КО и охлаждения отливки.
4. По способу дополнительного воздействия на кристаллизующийся расплав.



Исследуя процессы, протекающие на границе контакта расплава жаропрочного сплава на никелевой основе и КО, изготовленной на основе электрокорунда австрийской работы [44] установлено, что длительный контакт расплава с КО приводит к образованию на поверхности взаимодействия поверхностные слои отливки на глубине. При этом в результате взаимодействия (на 1%) содержание Cr.

Для предупреждения взаимодействия расплава и КО в условиях направленной кристаллизации авторы рекомендуют осуществлять полную или частичную замену кристаллизатора на дистен-силлиманит или муллита.

$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  в контактом слое КО на дистен-силлиманит или муллита в КО из поверхностного слоя отливки в зависимости от материала наполнителя огнеупорной суспензии, используемой для выполнения первого и второго слоя КО [44].

Таблица 11.12  
Количество хрома, перешедшего в КО из поверхностного слоя металла отливки, в зависимости от материала наполнителя огнеупорной суспензии КО

Наполнитель огнеупорной суспензии для первого и второго слоя КО	Жаропрочный сплав на основе Ni	Звтектический сплав на основе Co
Электрокорунд ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ )	0,7–1,2	0,7–1,2
Электрокорунд ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), $\text{TiO}_2$ (анатазной формы)	0,11–0,14*	0,10–0,20*
Дистен-силлиманит	0,06–0,08	0,10–0,15
Дистен-силлиманит, предварительно обожженный при:		
1400°С	0,20–0,30	0,25–0,30
1600°С	0,10–0,15	0,12–0,18
Муллита ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ )	0,02–0,08	0,18–0,22

Примечание. \* Исследован сплав, не содержащий углерод.

Анализ данных, приведенных в табл. 11.12, показывает, что наименьшее количество хрома, перешедшего в КО из отливки, наблюдается при использовании в качестве наполнителя огнеупорной суспензии для первых двух слоёв КО негравленого дистен-силлиманита или муллита. При этом авторы работы [44] отмечают, что использование для первого слоя КО порошка, приготовленного из синтетических монокристаллов рубина (0,36% Cr), позволяет полностью исключить взаимодействие расплава с КО.

Другим направлением, позволяющим сократить степень взаимодействия расплава с КО, является сокращение длительности контакта жидкого металла и КО. Данное направление в условиях направленной кристаллизации реализовано в процессе бестигельной плавки металла с постепенной наплавкой металла в процессе данного процесса состоит в том, что заготовку сплава помещают в чашу КО и нагревают вместе с ней. Со временем, по мере плавления шихтовой заготовки, появляющийся расплав стекает в КО, где тут же происходит её кристаллизация. То есть, процесс вывода КО из активной зоны печи начинают с поступлением первых порций жидкого металла в рабочую полость КО. При этом удельная скорость наплавки металла в ЛЧ (количество поступающего расплава в КО) должна строго соответствовать определённой скорости вывода КО из активной зоны печи (синхронизировать со скоростью продвижения фронта кристаллизации в отливке).

Данный способ позволяет не только сократить длительность контакта расплава с КО, но и значительно сократить протяжённость двухфазной области затвердевания сплава, что существенно улучшает условия питания затвердевающей отливки.

Основной недостаток данного способа – сложность реализации в условиях промышленного производства литья

Сущность способа LMC [322, 343] (см. рис. 11.67, где обозначены: 1 – передвижной плав 2 – графитовый нагреватель или концентратор; 3 – индуктор; 4 – КО; 5 – растую до температуры ликвидуса сплава и заливную расплава КО 4 вертикально-поступательно, выводят из зоны нагрева (активной зоны печи) и определённой скоростью погружают в более холодную жидкую охлаждающую среду 5 (расплав легкоплавкого материала – алюминия, олова). В данном способе интенсификация охлаждения достигается за счёт тепловода (теплопроводностью и конвекцией) от заливной КО при её поступательном погружении в охлаждающую жидкометаллическую среду.

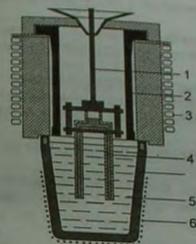


Рис. 11.67. Схема установки направленной кристаллизации по способу LMC

Для реализации способа LMS в условиях вакуума в качестве охлаждающей жидкометаллической среды используют только металлические расплавы с низкой и высокой температурой кипения. Кроме этого используемый для охлаждения металл (металл-охладитель) должен иметь низкую температуру плавления, высокую теплопроводность и теплоёмкость, большой коэффициент термического расширения, химическую инертность к материалу отливки, КО и ёмкости, в которой он находится, должен быть не токсичен, не радиоактивен, не дефицитен и не дорог.

Из числа известных металлических легкоплавких сплавов и металлов в вакуумных плавильно-заливочных установках направленной кристаллизации наиболее широкое применение нашёл алюминий. Помимо алюминия в качестве охлаждающих сред могут быть использованы: олово, галлий, индий, а также звтектические сплавы, приготовленные на основе данных металлов.

В случае, если необходимо получить монокристаллическую отливку со строго регламентированной кристаллографической ориентацией, в рабочей полости КО предусматривают выполнение "стартового" конуса с кристалловодом и установкой кристалла-затравки.

Способ LMC реализован в вакуумных установках, например типа УВНК, используемых в литейных цехах серийного производства турбинных лопаток из жаропрочных никелевых сплавов. Основными технологическими параметрами и требованиями получения отливок с монокристаллической структурой в данных установках в условиях серийного производства литья являются:

- стабильность температуры КО до заливки (допускается отклонение температуры КО от заданной величины в пределах  $\pm 8^\circ\text{C}$ );  
 - стабильность температуры заливаемого сплава в КО;  
 - стабильность скорости заливки металла в КО;  
 - стабильность скорости выведения скорости выведения заливки КО из зоны нагрева в зону охлаждения и поддерживаться с точностью  $\pm 1\%$  от требуемых величин;  
 - градиент температуры области двухфазного состояния кристаллизующегося металла отливки должна быть не более  $10\text{ мм}$ ;  
 - протяженность КО в установках должно быть строго фиксировано, предельно отливки к плавке положение КО в установках должно соответствовать требованиям, предъявляемым к ним и отличаться, по массе, от требуемого значения не более чем на  $100\text{ г}$ ;  
 - глубина (степень) вакуума в установках должна быть в пределах от  $1$  до  $5\text{ мм рт. ст.}$

Сущность способа FBQ [346] аналогична способу LMC (см. рис. 11.68, где обозначены: 1 — индуктор; 2 — графитовый нагреватель или концентратор; 3 — КО; 4 — обмотка; 5 — рубашка водяной КО погружается не в расплав, а в холодный псевдокипящий слой зернистого материала. То есть охлаждение отливки в данном способе осуществляется путём погружения заливки КО в ёмкость с горизонтально расположенной перфорированной перегородкой внутри, на которую насыпан, например, слой электрокорунда № 20 или № 40 или смесь электрокорунда с алюминиевыми гранулами, размер которых соизмерим с размерами частиц электрокорунда [318]. Кипящий слой в охлаждающей ёмкости создают путём подачи под перфорированную перегородку инертного газа.

Данный метод обеспечивает скорость кристаллизации расплава отливки на уровне метода LMC. Однако использование газа, содержащего даже следы влаги, для создания кипящего слоя материала-охлаждителя допустимо не во всех случаях. Поэтому способ FBQ для получения отливок из жаропрочных сплавов на основе никеля в настоящее время не используют.

В работе [74] для получения направленно-закристаллизованных отливок из алюминиевых сплавов способом FBQ использовали установку с кипящим слоем охлаждаителя, схема которой представлена на рис. 11.69.

Установка состоит из трёхсекционной печи сопротивления 1, предназначенной для нагрева КО перед заливкой до  $650...700^\circ\text{C}$ , верхней 2 и нижней 5 крышки, цилиндра 9, охлаждающей ёмкости (контейнера) для охлаждения заливки КО 6, оснащённого перфорированной перегородкой (пористой мембраной) 10 и кольцевой газовой горелкой 7. Помимо всего прочего, контейнер 6 оснащён водоохлаждаемой

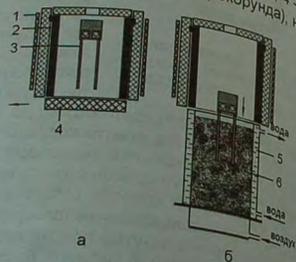


Рис. 11.68. Схема установки направленной кристаллизации по способу FBQ

рубашкой и содержит зернистый электрокорунд № 20. Для создания кипящего слоя в контейнер подают воздух.

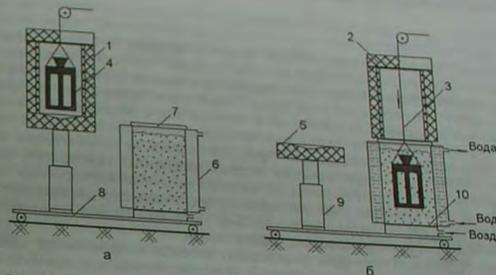


Рис. 11.69. Схема установки направленной кристаллизации в кипящем слое: а — положение КО в установке до и после её заливки расплавом; б — положение КО в установке по окончании кристаллизации расплава в КО

Для получения направленно-закристаллизованных отливок используют КО, имеющие 4...5 слоёв огнеупорного покрытия, изготовленных на основе ГРЭС, электрокорунда. Алюминиевый сплав к заливке готовят в печи открытого типа. Заливку расплава в КО совмещают с его фильтрацией через стеклоткань ССФ-3 и ливки керамическую трубку, вставленную в стояк КО. По окончании загрузки в "кипящий" слой электрокорунда контейнера.

Общим недостатком всех рассмотренных способов направленной кристаллизации отливок является их относительно высокая энергоёмкость, обусловленная необходимостью нагрева КО до температуры, превышающей температуру плавления заливаемого сплава, и необходимость перемещения КО относительно зоны нагрева с определённой скоростью. Кроме того, для реализации данных способов используют КО со специальным комплексом свойств и относительно толстыми стенками.

П.В. Лебедев и Ю.В. Калюкин разработали способ и устройство, которые позволили исключить предварительный нагрев КО до температуры, превышающей температуру ливки расплава, и не требующие перемещения отливки в пространстве при кристаллизации расплава. Для реализации данного способа авторы использовали электрический ток.

В основу воздействия электрического тока на кристаллизующийся расплав в условиях направленной кристаллизации отливки положено различие электрического сопротивления твёрдой и жидкой фаз сплава. Различная величина удельного электрического сопротивления металла, находящегося в различных агрегатных состояниях в КО, приводит к тому, что в твёрдой и жидкой части сплава отливки, как проводника электричества, при прохождении электрического тока выделяется различное количество теплоты. Данное физическое явление описывается законом Джоуля—Ленца, согласно которому количество теплоты, выделяемое проводником,

прямо пропорционально сопротивлению проводника (R), времени течения тока в проводнике ( $\tau$ ) и квадрату силы тока (I), проходящего через проводник

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \tau.$$

Поскольку удельное сопротивление жидкого металла в 1,5...2,0 раза выше твердого, то проходящий через расплав электрический ток более интенсивно будет нагревать жидкую часть отливки, чем твердую. При этом на фронте кристаллизации электрический ток, в первую очередь, будет "перетекать" через выступающие в расплаве вершины дендритов, оплавления их в течение всего периода кристаллизации отливки. В результате этого фронт кристаллизации отливки становится в расплаве, что позволяет получать необходимую структуру отливок из эвтектических сплавов при меньших осевых градиентах температур, пористость отливок из обычных жаропрочных сплавов за счёт уменьшения протяженности двухфазной зоны и улучшения условий питания фронта кристаллизации затвердевающей отливки.

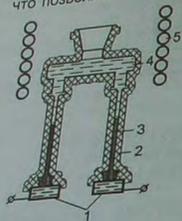


Рис. 11.70. Схема установки П-образной КО на электрокристаллизаторы

Для реализации способа направленной кристаллизации отливок с использованием П-образной КО 2 с открытым дном установкой 1, каждая секция которого медный кристаллизатор [103, 140]. После нагрева КО до 800...1000°C от источника, её заливают расплавом 4, что приводит к созданию замкнутой электрической цепи между электродами кристаллизатора.

Кристаллизация залитого в КО расплава начинается с поверхности секций водоохлаждаемых кристаллизаторов и в дальнейшем регулируется изменением плотности тока, проходящего через металл отливки. Для поддержания жидкого состояния металла в прибыльной части КО в процессе кристаллизации отливки в верхней части установки направленной кристаллизации отливок предусмотрен индуктор 5, охватывающий верхнюю часть литниковой системы КО. По мере увеличения доли затвердевшей части отливки 3 электрическое сопротивление цепи понижается, вследствие чего повышается плотность тока. В случае, если процессом кристаллизации не управлять, то с повышением плотности тока повысится и температура на фронте кристаллизации, что приведёт к остановке процесса кристаллизации в КО.

То есть изменяя плотность тока и температуру в печи можно не только ускорять и замедлять процесс затвердевания отливок, но и останавливать его или осуществлять расплавление уже затвердевшей части металла отливки.

Реализацию данного способа получения направленно-закристаллизованных отливок осуществляют, например, для отливок из жаропрочных никелевых сплавов при постоянном токе со следующими параметрами: напряжение – 12...6 В, сила тока 600...800 А/см<sup>2</sup>.

Изменение силы тока, проходящего по затвердевающей отливке, приводит к изменению и температурного градиента по высоте отливки. В частности, исследованиями [217], проведенными на отливках из сплава ЖС-6У, установлено, что во время кристаллизации сплава, при плотности тока 620 А/см<sup>2</sup>, наибольший температурный градиент составляет 100 °С/см, который может быть достигнут при максимальной скорости роста твердой фазы в отливке (скорости продвижения фронта

кристаллизации) – 5 мм/мин. При плотности тока 800 А/см<sup>2</sup> рост твердой фазы в отливке прекращается, но температурный градиент при этом на фронте кристаллизации достигает 180 °С/см.

Следует отметить, что в данном способе кристаллизации, как и в других способах направленной кристаллизации, использующих водоохлаждаемый кристаллизатор на расстоянии ~100 мм от его поверхности. Поэтому в дальнейшем осевой процесс кристаллизации приобретает квазистационарный характер. При этом скорость кристаллизации уменьшается с ~40 мм/мин (на расстоянии 15 мм от кристаллизатора) до 5 мм/мин (на расстоянии ~100 мм от кристаллизатора) и, в дальнейшем не изменяется по всей длине отливки. Это свидетельствует о том, что дано-структурной практически любой длины без создания каких-либо зон нагрева КО.

Для обеспечения направленности затвердевания турбинных лопаток протяженностью до 130 мм специалисты ОАО "НПО Сатурн" (Россия) использовали электрический ток следующим образом. Согласно разработанному способу для изготовления турбинных лопаток используют КО, заформованному в опорный наполнитель. Формовки КО в опорный наполнитель осуществляют таким образом, чтобы после водоохлаждаемого двух- или более можно было установить на медный следствии каждая из секций трёхсекционный кристаллизатор для заливки. В верхней части рабочие полости КО выполняют функции электрода. В то обеспечивает не только одновременное заполнение между собой литниковой каналом, расплавом, но и электрический контакт между электродами рабочих полостей формы. Перед заливкой форму нагревают до 900...1000°C при непрерывной подаче охлаждающей воды во внутренние полости электродов-кристаллизаторов.

После заполнения формы расплавом включают электрический ток и перегре-части формы приводит к тому, что температура расплава в верхней части КО превысит температуру ликвидус сплава на 150...200°C, а нижняя часть КО имеет температуру, равную температуре ликвидус сплава. После достижения указанного состояния форму оставляют до окончания затвердевания расплава в ней. Несомненным достоинством данного способа направленной кристаллизации является его простота в реализации и возможность использования КО, изготовленных на основе белого электроокрунда и пылевидного дистен-силлиманита с ГРЭС, без добавления в огнеупорную суспензию алюминиевого порошка и других вспомогательных веществ, упрочняющих КО.

Существенным недостатком вышеописанного способа является невозможность его использования для отливок протяженностью более 100...130 мм, обусловленная ограниченной дистанцией охлаждающего воздействия кристаллизаторов на затвердевающий металл.

А.В. Попов с соавторами [217] для обеспечения направленной кристаллизации расплава отливок использовал явление повышения температуры кристаллизации расплава при воздействии на него высокого давления.

Данное физическое явление присуще материалам, которые в твердом состоянии занимают меньший объём, чем в жидком. В этом случае повышение температуры кристаллизации ( $\Delta$ , К/Па) веществ с ростом давления описывается уравнением Клайперона-Клаузиуса, которое можно записать в виде:

$$\frac{dS}{dV} = \frac{dT}{L}$$

или

$$\Delta = \frac{dT}{dP} = \frac{\left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2}\right) T_{кр}}{L}$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — плотность металла (сплава) в жидком и твердом состоянии при температуре кристаллизации при нормальных условиях соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $T_{кр}$  — температура кристаллизации металла (сплава) при нормальных условиях, К;  $L$  — теплота плавления (кристаллизации) металла или сплава, Дж/кг.

Решив уравнение (11.50) относительно значения  $T_{кр}$ , не сложно увидеть, что с повышением давления на расплав повышается и температура его кристаллизации.

Например, при атмосферном давлении свинец затвердевает при температуре 327°C, а при давлении 334,4 МПа — при температуре 532°C.

В качестве примера, используя уравнение Клайперона—Клаузиуса, рассчитали

Таблица 11.13

Исходные данные и расчётные значения  $\Delta$  для железа, никеля и кобальта

Металл	$\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_2$ , кг/м <sup>3</sup>	$T_{кр}$ , К	$L$ , Дж/кг	$\Delta$ , К/Па
Fe	7035	7265	1812	277007	$2,94 \cdot 10^{-8}$
Ni	7750	8210	1728	300511	$4,13 \cdot 10^{-8}$
Co	7790	8180	1767	266065	$4,06 \cdot 10^{-8}$

Примечание. Данные о плотности металлов при температуре плавления взяты из работы [19].

Следует отметить, что обычное сжатие расплава под большим давлением (например, путём прессования жидкого металла на прессе) приводит к появлению во всём объёме расплава огромного количества центров кристаллизации и, в конечном счёте, к получению отливки с гранулярной структурой. При этом уровень механических свойств литого металла будет практически аналогичен свойствам ковкого металла и не будет зависеть от направления приложения нагрузки к детали.

В этом отношении весьма показательными являются результаты исследований К.Н. Смирновой по получению деталей путём их штамповки из жидкой стали в стальной пресс-форме [262]. Использование пресса, обеспечившего создание величины удельного давления на затвердевающую в пресс-форме сталь не менее  $8 \text{ кг/мм}^2$ , позволило К.Н. Смирновой получить литые детали массой от 1,5 до 60 кг без усадочных дефектов, с уровнем механических свойств, аналогичным кованным деталям и выходом годного 0,95. При этом длительность нахождения детали под давлением в пресс-форме, например, для детали массой 20 кг, составляла около 20 с. По данным К.Н. Смирновой, макроструктура полученных деталей характеризовалась настолько плотным мелкозернистым строением, что даже использование глубокого травления на макроструктуру шлифов, изготовленных из полученных отливок, не позволило выявить её.

То есть для инициализации процесса кристаллизации перегретого расплава необходимо сжать расплав (оказать на него определённое давление), а для создания эффекта направленной (ориентированной) кристаллизации металла в форме

следует создать ориентированный градиент давления в расплаве, перемещающийся во времени и пространстве в направлении от отливки к её прибору.

Данный принцип А.В. Попов с сотрудниками реализовал на центробежной установке с вертикальной осью вращения в условиях термостабилизации КО, нагретой на несколько градусов выше температуры ликвидуса затвердеваемого в КО сплава.

Поскольку в условиях вращательного движения формы центробежная сила ориентирована, то это приводит к появлению в расплаве, залитом в форму, нелинейно-распределённого поля давлений в радиальном направлении ( $x$ ) от оси вращения формы. Давление  $P(x)$ , которое испытывает расплав при вращении в центрифуге, рассчитывают по формуле (Па):

$$P(x) = 5,55 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 \cdot x^2 \cdot \rho_l \quad (11.51)$$

где  $n$  — частота вращения формы, мин<sup>-1</sup>;  $x$  — удаление рассматриваемого фрагмента расплава от оси вращения, см;  $\rho_l$  — плотность расплава, кг/м<sup>3</sup>.

То есть формируя ориентированное поле давлений за счёт изменения центробежной силы (частоты вращения формы), можно управлять процессом затвердевания отливки (координатой, направлением и скоростью перемещения фронта кристаллизации).

Как следует из формулы (11.51), в условиях вращения формы наибольшее давление в расплаве формируется в слое расплава наиболее удалённом от оси вращения. Поэтому с повышением частоты вращения формы (с повышением давления) процесс кристаллизации расплава начинается именно в этом слое. С приближением координаты фронта кристаллизации расплава к оси вращения значение  $n$  непрерывно уменьшается, поэтому для обеспечения постоянства значения  $P(x)$  на фронте кристаллизации и обеспечения непрерывного продвижения фронта кристаллизации в отливке в направлении к оси вращения формы частоту вращения формы в процессе кристаллизации расплава необходимо непрерывно увеличивать. Изменение частоты вращения формы, обеспечивающей непрерывность продвижения фронта кристаллизации вдоль отливки при переменной величине ( $x$ ), можно рассчитать из уравнения (11.51), приняв  $P = \text{const}$ .

Приведённые авторами данного способа результаты исследования качества полученных отливок (при коэффициентах гравитации от 0 до 6000) свидетельствуют о том, что при получении отливок данным способом полностью устраняется пористость и спай в отливках. При этом в жаропрочных сплавах типа ЖС-6 размеры карбидов уменьшаются в 2...3 раза, размер зерна уменьшается в 3...4 раза, размер  $\gamma$ -фазы уменьшается в 2,5...3 раза, а её относительный объём повышается до 80...85%.

Помимо вышеописанных способов, направленности кристаллизации расплава в отливке достигают самыми разными способами. Например, по способу, предложенному Г.М. Спенлёвым с соавторами, для обеспечения направленности затвердевания отливок, КО располагают в профильном графитовом контейнере (опокке), установленном на поддоне-холодильнике, а пространство между КО и стенками контейнера заполняют высокотеплопроводным огнеупорным наполнителем. Согласно предлагаемому способу заформованную КО нагревают вместе с контейнером до 1100...1500°C и, не извлекая из нагревательной печи, заливают расплавом, перегретым на 80...120°C выше температуры ликвидуса. После заливки контейнер с определённой скоростью извлекают из нагревательной печи с одновременным интенсивным охлаждением дна контейнера. Особенностью данного способа направленной кристаллизации отливок является использования разнофракционного

опорного наполнителя и его последовательно-последняя засыпка в контейнер, начиная с мелких фракций и заканчивая крупными фракциями.

В работе [199] для обеспечения направленной кристаллизации расплава КО предварительно установленную на холодильник, засыпают экзотермической смесью. Горение экзотермической смеси, сопровождающееся выделением большого количества теплоты, позволяет нагреть КО до требуемой температуры, обеспечивая направленность кристаллизации залитого в КО расплава в направлении от холодильника к прибыли отливки.

Для создания направленного затвердевания расплава в крупной пустотелой турбинной лопатке авторы работы [331] использовали полый тонкостенный керамический стержень, послойно заполненный материалами с различной теплопроводностью, в последовательности: железные опилки, глинозём, асбест. В данном случае направленность по высоте отливки (снизу вверх) достигалась в результате уменьшения по высоте отливки достигаемых интенсивности теплового от залитого в форму расплава к керамическому стержню.

Рассматривая вопрос о качестве направленно-закристаллизованных отливок следует отметить значительное влияние отливки, так и режима вывода залитой КО направленной кристаллизации отливки, так и режима вывода залитой КО из зоны нагрева КО в способах HRS, LMC и FBQ.

В настоящее время подавляющее большинство отливок, получаемых способом направленной кристаллизации, представляют собой тела, по конфигурации близкие к телам правильной геометрической формы. В связи с этим, назначение режима вывода залитой КО из зоны её нагрева в установке направленной кристаллизации, обеспечивающего требуемый уровень качества отливки, как правило, не представляет больших проблем.

Значительно сложнее обстоит дело при назначении режима вывода КО фасонной отливки, где, как правило, кристаллизацию расплава в КО проводят с переменной скоростью её вывода и зоны нагрева. При эмпирическом подходе к решению данного вопроса требуются значительные материальные и временные затраты, тем не менее не всегда гарантирующие достижение положительного результата. Поэтому режим выведения фасонной отливки из активной зоны печи нагрева КО целесообразно назначать по результатам математического моделирования затвердевания отливки.

**Математическая модель процесса направленной кристаллизации фасонной осесимметричной отливки.** В настоящее время существует достаточно большое количество математических моделей направленной кристаллизации отливок практически для любых известных способов и конструкций установок направленной кристаллизации. Поэтому в качестве примера приведём математическую модель процесса направленной кристаллизации фасонной осесимметричной отливки, разработанную В.Д. Колесником для способа HRS.

В качестве объекта исследования рассмотрим отливку "Ротор", представляющую собой вал переменного сечения со средним диаметром 35 мм и длиной 340 мм, в средней части которого выполнена крыльчатка. Отливку изготавливают из стали 08X14H7MЛ в электрокорундовой КО.

Попытки изготовить отливку "Ротор" по "классической" технологии изготовления большинства отливок с использованием формовки КО в опорный наполнитель и заливкой на воздухе из ковша показали, что во всех полученных отливках, независимо от температуры перегрева заливаемого в КО расплава, начальной температуры КО и удельной скорости заливки КО, в верхней (относительно положения отливки при её заливке) части вала образовывалась усадочная раковина значительных размеров, что схематично представлено на рис. 11.71.



Рис. 11.71. Схема расположения усадочной раковины (зачернена) в отливке "Ротор"

В связи с этим изготовление отливки "Ротор" было переведено на вакуумную установку направленной кристаллизации, в конструкции которой реализован способ HRS, с непосредственным контактом металла отливки с поверхностью медного кристаллизатора.

Исследования качества отливок, полученных на установке направленной кристаллизации, при выводе залитых КО из активной зоны печи с постоянной скоростью (3, 7 или 12 мм/мин) показали, что использование способа направленной кристаллизации не позволило избежать образования в верхней части вала усадочной раковины, хотя её размеры и стали значительно меньшими.

В связи с этим, для проведения оптимизации режима вывода залитой КО из активной зоны нагревательной печи была разработана и адаптирована соответствующая математическая модель, по которой составлена компьютерная программа, позволяющая провести компьютерное моделирование процесса затвердевания отливки "Ротор".

На основании результатов компьютерного моделирования был разработан оптимальный режим вывода КО из активной зоны печи установки направленной кристаллизации отливок, реализация которого позволила получать отливки "Ротор" без усадочных раковин, рыхлот и

макропористости.

Для моделирования была принята схема тигельной плавки мерной шихтовой заготовки с последующим заполнением КО расплавом и выводом КО из зоны её нагрева при непосредственном контакте металла отливки с поверхностью медного кристаллизатора.

Процедуру компьютерного математического моделирования начинают с изучения чертежа отливки, назначения положения отливки в пространстве при кристаллизации и выявления наиболее проблематичного, в отношении питания при кристаллизации, узла отливки.

После этого на бумаге с миллиметровой сеткой вычерчивают интересующее сечение, наносят контуры внешней поверхности КО и строят сеточную область выбранного сечения. Для этого на расчётную область (исследуемое сечение отливки) графически наносят прямоугольную сетку с определённым (возможно, переменным или постоянным) шагом узлов, обеспечивающим достаточно полное воспроизведение всех участков расчётной области отливки и КО. Криволинейные поверхности отливки и КО спрямляют таким образом, чтобы их границы проходили по линиям наносимой сетки (см. рис. 11.72). После этого всем узлам, принадлежащим одной области, присваивают одинаковые номера (однопозиционные символы), например, номер 2 – область металла, 3 – область КО, 4 – область концентратора (нагреватель печи), 0 – "пустая область", или область не заполненная никаким материалом, 9 – "пустая область" внутри КО, которая, в следствии в процессе счёта заполняется расплавом металла.

Информация о конфигурации области в виде массива символов (маркеров) КК (1:М, 1:Н) вводится во входном файле исходных данных. В процессе расчёта температурного поля организуют идентификацию каждого расчётного узла согласно его маркера и определения значений соответствующих его области теплофизических коэффициентов. Для коэффициентов, зависящих от температуры, по маркеру

определяют вид данной зависимости, а по значениям температуры – его конкретные величины.

Общая сеточная схема в виде сеточной области размером  $\{M, N\}$  с координатами  $i = (1 \dots M)$ ,  $j = (1 \dots N)$ . В сеточной области выделяют подобласти металла (1) и КО (2) с различными границами, спрямлёнными в пределах сеточной разбивки. Верхняя граница области в пределах сеточной разбивки, соответствует переменной величине расстояния от верха до зеркала металла (Z<sub>M</sub>).

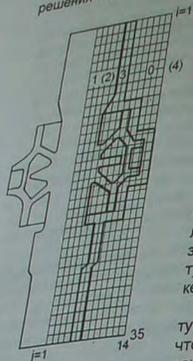


Рис. 11.72. Сеточная схема отливки "Ротор"

Выводят из уравнения движения:

$$V_C = \frac{d(Z_C - Z_{CO})}{d\tau}; \quad (11.52)$$

$$V_M = \frac{d(Z_M - Z_{MO})}{d\tau}; \quad (11.53)$$

где Z<sub>CO</sub> и Z<sub>MO</sub> – начальное положение границ нагревателя и металлической ванны в КО соответственно; V<sub>C</sub> и V<sub>M</sub> – скорость выведения отливки из печи и скорость поступления жидкого металла в КО, соответственно.

Положение границ Z<sub>CO</sub> и Z<sub>MO</sub> и соответствующие им целочисленные значения MC и MM определяют на каждом временном слое τ по следующим зависимостям.

$$Z_M^i = Z_M^{i-1} - V_M \cdot \Delta\tau; \quad MM = \text{Entier} \left( \frac{Z_M}{\Delta z} \right);$$

$$Z_C^i = Z_C^{i-1} - V_C \cdot \Delta\tau; \quad MC = \text{Entier} \left( \frac{Z_C}{\Delta z} \right);$$

По значениям этих величин определяют границы области металла и значения граничных температур T<sub>кз</sub>.

Расчёт температурного поля в различных областях системы, а также перемещения фронтов затвердевания проводят на основе решения двумерного нестационарного уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах с переменными свойствами, зависящими от координат и температуры:

$$C_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \right) + Q_{кр}; \quad (11.54)$$

где C<sub>0</sub>(r, z, t) – объёмная теплоёмкость материала; t(r, z, t) – температура; τ – время; r, z – координаты; λ(r, z, t) – коэффициент теплопроводности материала; Q<sub>кр</sub> – теплоты кристаллизации расплава; t<sub>л</sub> и t<sub>с</sub> – температура ликвидус и солидус сплава соответственно.

$$Q_{кр} = \chi_0 \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \tau}; \quad (11.55)$$

где χ<sub>0</sub> – удельная (объёмная) скрытая теплота кристаллизации сплава;  $\frac{\partial \varphi}{\partial \tau}$  – скорость образования новой фазы или темп кристаллизации.

Согласно квазистационарной теории двухфазной зоны [251] доля твёрдой фазы в двухфазной области затвердевающего сплава зависит только от температуры сплава и для сплава постоянного состава определяется из равновесной диаграммы состояния. Исходя из этого положения, можно записать:

$$\frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{\partial \varphi}{dt} \cdot \frac{dt}{d\tau}; \quad (11.56)$$

$$Q_{кр} = \chi_0 \cdot \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{dt}{d\tau}; \quad (11.57)$$

Подставив последнее выражение в уравнение (11.56) получим:

$$C_E \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \cdot r \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \right); \quad (11.58)$$

где C<sub>E</sub> – эффективная величина объёмной теплоёмкости, учитывающая выделение тепла кристаллизации в двухфазной области сплава.

$$C_E = \begin{cases} C_L & \text{нпу} \quad t > t_L \\ C_L \cdot (1 - \varphi) + C_S(\varphi) + \chi_c & \text{нпу} \quad t_S < t \leq t_L \\ C_S & \text{нпу} \quad t \leq t_S \end{cases}$$

Зависимость относительного количества твёрдой фазы в области двухфазного состояния сплава от температуры представляют зависимостью:

$$\psi(t) = a \cdot \theta + b \cdot \theta_2$$

$$\Theta = \frac{t_L - t}{t_L - t_S}$$

где, например, для никелевых сплавов типа ВЖЛ:  $a=0,32$  и  $b=0,68$ . В этом случае:

$$\frac{dY}{dt} = \frac{dY}{d\Theta} \cdot \frac{d\Theta}{dt} = \frac{2 \cdot a}{t_L - t_S} \cdot \Theta + \frac{b}{t_L - t_S}$$

Решение уравнения (11.58) проводят методом конечных разностей с расщеплением оператора по аддитивной схеме [160]. Обозначим:

$$\Lambda_1 = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left( r \cdot \lambda \cdot \frac{\partial}{\partial r} \right);$$

$$\Lambda_2 = \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left( \lambda \cdot \frac{\partial}{\partial z} \right).$$

Тогда уравнение (11.58), с учётом принятых обозначений, примет вид:

$$C_E \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = \Lambda_1 \cdot T + \Lambda_2 \cdot T.$$

Схема расщепления:

$$C_E = \begin{cases} C_E \cdot \frac{\partial T^{r+0,5}}{\partial T} = \Lambda_1 \cdot T^{r+0,5} \\ C_E \cdot \frac{\partial T^{r+1}}{\partial T} = \Lambda_2 \cdot T^{r+1} \end{cases}$$

Построим консервативную аппроксимацию уравнений, для чего проинтегрируем их по переменным  $r$  и  $z$  в пределах шага сетки, заменив не берущиеся интегралы квадратурными формулами. В этом случае конечно-разностные уравнения (11.56) и (11.57) будут иметь вид:

$$(t_{i,j}^{r+0,5} - t_{i,j}^r) \cdot C_r = A \cdot t_{i,j+1}^{r+0,5} - (A+C) \cdot t_{i,j}^{r+0,5} + C \cdot t_{i,j-1}^{r+0,5}, \quad ii=0;$$

$$(t_{i,j}^{r+0,5} - t_{i,j}^r) \cdot C_r = A \cdot t_{i,j+1}^{r+0,5} - (A+C) \cdot t_{i,j}^{r+1} + C \cdot t_{i,j-1}^{r+1}, \quad ii=1,$$

где  $ii=0$  соответствует уравнению (11.56) для горизонтальной прогонки,  $ii=1$  соответствует уравнению (11.57) для вертикальной прогонки;  $\tau$  — текущий временной слой.

Проводя перенос в правую часть уравнений членов, относящихся к одному временному слою, и обозначив:

$$B=A+C+\tau,$$

получаем определяющуюся систему уравнений:

$$A \cdot t_{i,j+1}^{r+0,5} - B \cdot t_{i,j}^{r+0,5} + C \cdot t_{i,j-1}^{r+0,5} = -C \cdot t_{i,j}^r, \quad ii=0;$$

$$A \cdot t_{i,j+1}^{r+1} - B \cdot t_{i,j}^{r+1} + C \cdot t_{i,j-1}^{r+1} = -C \cdot t_{i,j}^{r+0,5}, \quad ii=1.$$

Если обозначить:

$$t_{S+P} = t_{i+j \cdot P, i+j \cdot P(1-i)}$$

где  $P=0; 1$  и  $F_S = C_r \cdot t_S^r$ , то получаем одно общее уравнение для обоих расщепленных конечно-разностных уравнений:

$$A_S \cdot t_{S+1} - B_S \cdot t_S + C_S \cdot t_{S-1} = -F_S$$

или, опустив символ  $S$  при коэффициентах:

$$A \cdot t_{S+1} - B \cdot t_S + C \cdot t_{S-1} = -F. \quad (11.59)$$

Это общее уравнение является основным уравнением для построения общего алгоритма решения для горизонтального и вертикального расщепления методом прогонки.

Запишем формулы прогонки:

$$t_{S+1} = t_S \cdot x_S + y_S, \quad (11.60)$$

где  $x_S, y_S$  — коэффициенты прогонки.

Подставив выражение (11.60) в уравнение (11.59), получим:

$$t_S = \frac{C}{B-A \cdot x_S} \cdot t_{S-1} + \frac{A \cdot y_S + F}{B-A \cdot x_S}.$$

То есть коэффициенты прогонки определяются прямой прогонкой по формулам:

$$x_{S-1} = \frac{C}{B-A \cdot x_S}; \quad y_{S-1} = \frac{A \cdot y_S + F}{B-A \cdot x_S}; \quad s=k, k-1, \dots, 1.$$

Температура в узлах определяется по формуле обратной прогонки:

$$t_S = x_{S-1} \cdot t_{S-1} + y_{S-1}; \quad s=1, \dots, k_{S-1}, k_S.$$

Значения коэффициентов прогонки в граничных точках  $S=1$  и  $S=N$  определяются из граничных условий. На внешних границах КО ( $r=R(Z)$  и  $Z=Z(0)$ ) теплообмен с

окружающими элементами печи осуществляется излучением и конвекцией к охлаждающей воде, поэтому запишем их в виде граничных условий третьего рода.

На боковой поверхности КО теплообмен излучением со стороны стенок нагревателя и холодильника:

$$\lambda_F \cdot \frac{\partial t}{\partial r_{\text{вн}}} = \alpha_{\text{лпч}} \cdot (t_{(z, R)} - t_{N(z)});$$

$$\alpha_{\text{лпч}} = C_N \cdot (t_{(z, R)}^2 - t_{N(z)}^2) \cdot (t_{(z, R)} - t_{N(z)});$$

$$C_N = C_0 \cdot \left[ \frac{1}{\varepsilon_\phi} + \frac{R_\phi}{R_N} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_N} - 1 \right) \right],$$

где  $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ ;  $\varepsilon_\phi$ ,  $\varepsilon_N$  — степень черноты внешней поверхности КО и внутренней поверхности графитового нагревателя печи соответственно;  $R_\phi$ ,  $R_N$  — радиус КО и графитового нагревателя печи соответственно;  $t_{N(z)}$  — температура участка поверхности графитового нагревателя печи или кристаллизатора, находящегося на одном уровне с расчётным элементом теплообмена с охлаждающей водой на одной из поверхностей КО теплообмен с охлаждающей водой происходит через стенку медного кристаллизатора:

$$\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=0} = a_n \cdot (t_{(z_0, r)} - t_0),$$

где  $t_0$  — начальная температура охлаждающей воды;

$$a_n = \left( \frac{1}{\alpha_n} + \frac{\Delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} \right)^{-1} - \text{приведенный коэффициент конвективного теплообмена,}$$

где  $\alpha_n$  — коэффициент теплоотдачи от стенки холодильника к воде;  $\Delta_{\text{ст}}$  — толщина стенки холодильника;  $\lambda_{\text{ст}}$  — коэффициент теплопроводности материала стенки холодильника.

На оси отливки ( $r = 0$ ) и верхней поверхности ( $z = 0$ ) принимают условия адиабатности:

$$\frac{\partial t}{\partial r_{r=0}} = 0; \quad \frac{\partial t}{\partial z_{z=0}} = 0.$$

"Адиабатность" поверхности  $r = 0$  принята из условия симметричности, "адиабатность" поверхности  $z = 0$  принята из анализа условий процесса. Верхнюю часть графитового нагревателя в установках направленной кристаллизации теплоизолируют от остальных поверхностей печи. При этом предполагается, что некоторое понижение температуры поверхности изоляции за счёт её несовершенства компенсируется переизлучением от более нагретых участков нагревателя.

Приведенные выше формулы получены в достаточно общей форме, что позволяет проводить расчёты двумерного температурного поля тепловой системы

сложной конфигурации с учётом теплоты кристаллизации сплава в двухфазной области, заданной в произвольном виде.

По температурному полю в области металла, определяют положение изотерм "ликвидус" и "солидус". Если значения  $t_L$  или  $t_S$  находятся между двумя узловыми точками, то положение фронта между ними определяют линейной аппроксимацией

$$H_L(j) = H_i + \frac{t_L - t_{ij}}{T_{i+1} - t_{ij}} \cdot Z_i \quad \text{при} \quad t_j < t_L \leq T_{i+1};$$

$$H_S(j) = H_i + \frac{t_S - t_{ij}}{T_{i+1} - t_{ij}} \cdot Z_i \quad \text{при} \quad t_j < t_S \leq T_{i+1};$$

где  $H_i$  — расстояние точки  $i$  от крайней нижней точки отливки.

Реализация вышериведенного алгоритма и математической модели расчёта в компьютерной программе позволяет с достаточно высокой степенью точности вводить расчёты температурных полей и динамики затвердевания осесимметричных отливок в КО при нестационарных и подвижных граничных условиях.

Исходными данными для работы с программой служат: конфигурация области теплофизических характеристик областей и их зависимость от температуры, распределение температур по высоте нагревателя и кристаллизатора, закон (режим) выведения КО из печи и заполнения при этом КО жидким металлом.

Начальное температурное поле исследуемой системы и распределение температур по высоте нагревательной печи задают в виде аппроксимированных зависимостей от  $z$  и  $r$ .

В результате проведения расчётов на печать компьютера выводятся значения температур в расчётных узлах отливки, а также координаты фронтов затвердевания и скорости их перемещения в вертикальном направлении.

Схема плавления-заливочного узла установки направленной кристаллизации оливок, использованной для получения оливок "Ротор", а также результаты математического моделирования процесса направленного затвердевания отливки "Ротор" представлены на рис. 11.73.

На рис. 11.73,б представлена схема положения фронта кристаллизации в различное время затвердевания отливки (числа у изотерм — время в минуту с момента начала кристаллизации отливки) при постоянной скорости выведения ( $V=10$  мм/мин) КО из активной зоны установки направленной кристаллизации, а на рис. 11.73,в представлена схема положений фронта кристаллизации расплава в отливке в различное время, закристаллизованной при выводе КО по следующему режиму:

- этап 1 —  $V=10$  мм/мин в течение  $\tau_1=15$  мин;
- этап 2 —  $V=2,25$  мм/мин в течение  $\tau_2=40$  мин;
- этап 3 —  $V=9$  мм/мин в течение  $\tau_3=12$  мин.

Как следует из рис. 11.73,б, в случае постоянной скорости вывода КО ( $V=10$  мм/мин) из активной зоны установки характер затвердевания вала и крыльчатки до 48 минуты соответствует принципу направленной кристаллизации расплава в форме. На 48 мин (см. рис. 11.73,б) кристаллизации расплава в КО, изотерма температуры ликвидус "замыкается" в осевой верхней части вала отливки, образуя в ней тепловой непитаемый узел и, как следствие, усадочную раковину.

В случае переменной скорости вывода КО по оптимизированному режиму (см. рис. 11.73,в) направленность затвердевания отливки "Ротор" сохраняется по всей её высоте.

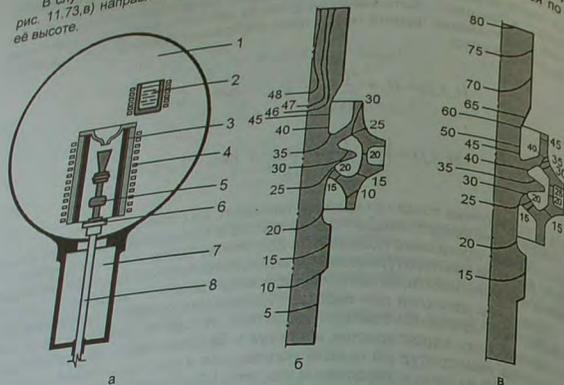


Рис. 11.73. Схема плавно-заливочного узла установки направленной кристаллизации отливок (а), положения фронта кристаллизации стали во времени в затвердевающей отливке при постоянной скорости вывода формы (б) и по разработанному режиму (в): 1 – рабочая камера; 2 – расплав в тигле; 3 – концентратор (нагреватель); 4 – индуктор концентратора; 5 – КО; 6 – медный, водоохлаждаемый холодильник; 7 – камера охлаждения; 8 – шток кристаллизатора

**Радиально-направленная кристаллизация (РНК).** Направленный тепловодот от затвердевающего сплава можно использовать и для получения в отливках кольцевого типа радиальной направленной кристаллизации, необходимой, например, для роторов, сопловых аппаратов и т.п.

Сущность способа РНК, разработанного автором, рассмотрим на примере получения отливки кольцевого типа, модельный блок которой представлен на рис. 11.74. Согласно рис. 11.74 модельный блок состоит из ЛВ 1, стояка 2, питателей шелевого типа 3 и модели отливки 4.

КО изготавливают на основе ГРЭС и электрокорунда. После выплавления из КО модельного состава её прокаляют при температуре 950...1000°C и вместе с печью охлаждают до комнатной температуры. Охлажденную КО формируют, для чего верхнюю и нижнюю стороны КО теплоизолируют и устанавливают на подвижный шток установки, схема рабочего узла которой представлена на рис. 11.75,а.

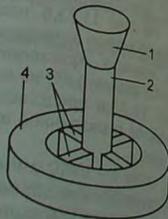


Рис. 11.74. Модельный блок для получения отливки кольцевого типа

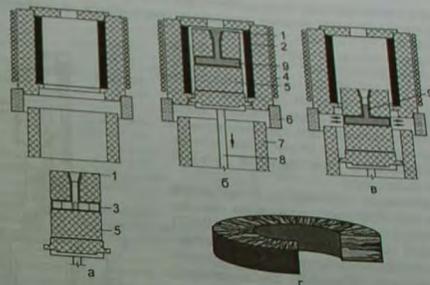


Рис. 11.75. Схема рабочего узла установки радиальной направленной кристаллизации (а...в) и макроструктура отливки кольцевого типа (г)

Рабочий узел установки состоит из индуктора 4, графитового нагревателя 2, кольцевого водоохлаждаемого теплоприёмника 6, теплоизолятора 7, подъёмного штока с установленной на него КО 3, верхним 1 и нижним опорным теплоизолятором 5 занимает только три фиксированных положения и не перемещается в процессе кристаллизации отливки.

В крайнем нижнем положении (см. рис. 11.75,а) шток находится в период установки и снятия с его стола КО. В верхнем положении (см. рис. 11.75,б) шток находится во время нагрева теплоизолированной КО и её заливки расплавом 9 (для реализации процесса, температура КО к моменту её заливки расплавом в активной зоне должна быть на 50...100°C выше температуры ливидуса заливаемого сплава).

После заливки КО, поддерживая постоянную температуру ливидуса заливаемого сплава, шток переводят в среднее положение (см. рис. 11.75,в).

Находясь в среднем положении штока, форма располагается в установке таким образом, что нетеплоизолированная внешняя поверхность КО находится на уровне кольцевого водоохлаждаемого теплоприёмника 6. Поскольку верхняя и нижняя часть КО теплоизолированы, то наиболее интенсивный тепловодот от формы происходит именно с открытой поверхности КО.

Благодаря такому преимущественному тепловоду от нетеплоизолированных стенок КО, температурный фронт в теле формы продвигается от её периферии к центру, что и обеспечивает получение отливки кольцевого типа с радиальной направленно-столбчатой макроструктурой (см. рис. 11.75,г).

В среднем положении шток находится до полного затвердевания расплава в КО, после чего нагрев в активной зоне прекращают, а шток с формой и затвердевшей отливкой опускают в крайнее нижнее положение.

С целью интенсификации процесса РНК, нетеплоизолированную поверхность КО оцелью жидкометаллическим теплоносителем, например, оловом.

**Объемно-направленная кристаллизация (ОНК).** В настоящее время способом литья с ОНК получают отливки из жаропрочных сплавов на никелевой и интерметаллидной основе с гранулярной макроструктурой (замороженными кристаллами) осуществляют двумя способами — при интенсивном направленном теплоотводе от расплава, имеющего невысокий (до  $-15^{\circ}\text{C}$ ) перепад над температурой ливидуса либо при интенсивном направленном теплоотводе от расплава, объемно-направленного теплового тупоглавыми ультрамодифицированными частицами.

Для изготовления отливок с гранулярной структурой из жаропрочных сплавов на никелевой и интерметаллидной основе ФГУП ММПП «Салют» (Россия) совместно с ОАО «Электроник» (Россия) разработали конструкцию вакуумной плавильной установки «Салют-3», схема которой представлена на рис. 11.76.

На рис. 11.76 обозначены: 1 — шихтовая заготовка ( $\varnothing 90 \times 600$  мм); 2 — узел бестигельной плавки (металлоемкость термостата — 20 кг); 3 — термостат для расплава (металлоемкость термостата — 20 кг); 4 — камера (металлоемкость термостата — 20 кг); 5 — печь подогрева форм ( $\varnothing 500 \times 600$  мм); 6 — механизм загрузки и формирования формы.

В конструкции установки «Салют-3» реализованы следующие концептуальные положения:

использование чистых и плотных шихтовых заготовок, полученных методом направленного затвердевания с фильтрационной очисткой расплава; получение шихтовых заготовок с гранулярной структурой; бестигельное индукционное оплавление шихтовых заготовок в условиях вакуума; заливка жидкого металла в тигель с донным сливом; ввод в расплав гранул нитридов и карбидов; высокая скорость заливки расплава в КО; затвердевание расплава в КО под низким давлением.

Как было отмечено выше, гранулярную структуру в отливках получают в результате переплава шихтовой заготовки, объемно-модифицированной тупоглавыми ультрамелкодисперсными частицами.

В частности, для сплава ЖС-6У таким модификатором являются частицы NbN, предварительно брикетированные и введенные в расплав в количестве 0,2% от массы жидкого сплава.

Дополнительное измельчения макрозерна гранулярной макроструктуры достигнуто за счёт поверхностного модифицирования отливки.

Литой сплав ЖС-6У с гранулярной макроструктурой и поверхностным модифицированием имеет уровень показателя по пределу прочности и пределу выносливости, аналогичный уровню свойств деформированного сплава ЖС-6УД.

В то же время по уровню термостойкости сплав ЖС-6У с гранулярной макроструктурой находится на уровне термостойкости сплава с направленно-столбчатой макроструктурой.

Сравнительные данные механических свойств сплава ЖС-6У с различной макроструктурой приведены в табл. 11.14.

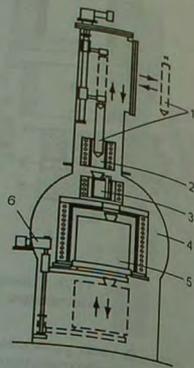


Рис. 11.76. Схема

Сравнительные данные механических свойств сплава ЖС-6У

Таблица 11.14

Условия литья, макроструктура	Диаметр макрозерна отливки	$\sigma_{0.2} \cdot 10^2$	$\sigma_{0.2} \cdot 10^2$	$\delta, \%$	a, МПа	$\tau, \text{ч}$	Q, цикл.
		МПа					
Исходная плавка	Равноосная (D= 2–4 мм)	9,8	8,4	4,0	0,15	45	1720
		5,5	4,8	5,0			
Модифицирование	Равноосная (D= 2–3 мм)	9	-	1,5	0,012	25	-
		-	-	-			
Гранулярная макроструктура	Гранулярная (D= 0,05–0,2 мм)	11,5	10,5	2,5	0,025	20	2120
		6	-	4,0			
Гранулярная, модифицированная макроструктура*	Гранулярная модифицированная (D= 0,01–0,15 мм)	12,4	11	10,5	0,040	18	2170
		6,5	-	4,5			

Примечание. В числителе указаны значения при  $20^{\circ}\text{C}$ , в знаменателе при  $975^{\circ}\text{C}$ . \* — отливки с гранулярной макроструктурой получены из модифицированной шихтовой заготовки сплава ЖС-6У. D — диаметр макрозерна,  $\tau$  — долговечность сплава, Q — термостойкость сплава.

Данные, приведенные в табл. 11.14, свидетельствуют о том, что наибольшей прочностью и термостойкостью, а также наиболее мелкодисперсной макроструктурой обладает модифицированный сплав с гранулярной макроструктурой. В то же время долговечность сплава ( $\tau$ ) с гранулярной макроструктурой понижается с уменьшением среднего размера макрозерна.

Средний размер макрозерна в отливках с гранулярной макроструктурой, как правило, изменяется от 0,01 до 0,8 мм. В частности, гранулярная макроструктура как полигранная, со сглаженными углами, не имеющая дендритного строения, с одинаковым кристаллографическим направлением решетки матрицы в пределах одного зерна и различным направлением кристаллографических решеток матрицы в разных зернах. При этом ликвация основных легирующих элементов по телу макрозерна отсутствует.

Микроструктура сплава ЖС-6У характеризуется мелкими выделениями карбонитридов и крупными выделениями  $\gamma$ -фазы.

Наличие гранулярной макроструктуры не позволяет получить металл отливки абсолютно лишенный усадочной пористости. Как правило, усадочная пористость в жаропрочных никелевых сплавах с гранулярной макроструктурой располагается по границам зерен около первичной  $\gamma$ -фазы. Причем обработка отливок из жаропрочных никелевых сплавов с гранулярной макроструктурой газовым изостатическим прессованием (ГИП) также не позволяет получить абсолютно плотную отливку.

Величина усадочной пористости сплава ЖС-6У с гранулярной макроструктурой, прошедшего ГИП, составляет 0,16%, при этом у сплава с равноосной макроструктурой величина усадочной пористости составляет 0,5...0,6%, а у сплава с направленно-столбчатой макроструктурой — 0,25...0,29%.

В работе [218] авторы отмечают, что обработка сплава ЖС-6У с гранулярной макроструктурой ГИП и термообработка при  $1200^{\circ}\text{C}$  не приводит к коагуляции и укрупнению  $\gamma$ -фазы, но способствуют устранению микропористости в металле.

Сравнительный уровень свойств для отливок с различной макроструктурой из сплава ВЖЛ-12У приведен в табл. 11.15 [218].

Таблица 11.16  
Свойства образцов из сплава ВЖЛ-12У с различной макроструктурой

Макроструктура отливки	Значения параметров при, соответственно, 20°С / 800°С / 975°С				a*, МПа	τ, ч	δ, %	ψ, %
	σв, МПа	σ0,2, МПа	δ, %	ψ, %				
Равноосная	850-880	770-790	6,5-7,6	6,0-7,2	0,020-0,030	39-41	7,1-8,2	8,4-9,9
	800-830	710-720	5,4-6,7	6,2-6,4				
	490-500	-	7,3-7,6	9,5-9,8				
Направленно-столбчатая	900-950	800-850	8,0-10,0	8,0-12,0	0,030-0,035	70-75	10,0-12,0	8,0-10,0
	870-880	700-750	5,0-7,0	6,0-8,0				
	450-550	-	5,0-9,0	6,0-9,0				
Гранулярная**	1120-1260	970-980	8,0-16,0	10,0-17,0	0,041-0,045	44-50	7,0-7,6	8,0-8,0
	900-920	750-780	10,0-12,0	11,0-12,0				
	620-730	450-580	6,0-12,0	7,0-12,0				

Примечание. \* - данные получены при 20°С. \*\* - отливки с гранулярной макроструктурой получены в условиях бестигельной плавки печи "Салют-3" с последующей обработкой ГИП (P=2000 ат, t=1200°С) и термической обработкой (4 ч при 1200°С).

Исследования термостойкости сплава ВЖЛ-12У (термостойкость сплавов испытывали на пустотелых клиновидных образцах по режиму: нагрев в среде продуктов сгорания авиационного топлива до 1000±200°С, выдержка - 1 мин, охлаждение - в струе сжатого воздуха в течение 1 мин) свидетельствуют, что образцы с равноосной макроструктурой выдержали 1600 циклов испытаний до разрушения, с направленно-столбчатой макроструктурой - 2360 циклов испытаний, с гранулярной макроструктурой - 2250 циклов испытаний.

Исследования уровня свойств сплава ВКНА-4 с гранулярной макроструктурой показывают [218], что, по сравнению с аналогичными значениями свойств сплава с равноосной и направленно-столбчатой макроструктурой, предел прочности и текучести сплава с гранулярной макроструктурой выше на 10...15%. При этом долговечности сплава с гранулярной структурой остаётся на уровне сплава с равноосной макроструктурой, уступая долговечности сплава (в 1,5 раза) с направленно-столбчатой макроструктурой.

По термостойкости сплав с гранулярной макроструктурой занимает промежуточное значение между аналогичными значениями сплава с равноосной и направленно-столбчатой макроструктурой, что следует из данных, приведенных в табл. 11.16.

Таблица 11.16  
Свойства сплава ВКНА-4 с различной макроструктурой

Макроструктура отливки	σв	σ0,2	δ	ψ	τ, ч	Q, циклов
	МПа		%			
Равноосная дендритная	700-720	360-380	10-13	10-15	110	105
Направленно-столбчатая	720-760	400-440	10-14	10-12	150	225
Гранулярная	770-820	450-480	10-12	-/-	100	180

Примечание. Величина τ определена при σ = 0,5 МПа и t = 1100°С.

Бесспорным преимуществом отливок с направленно-столбчатой и гранулярной макроструктурой перед отливками с равноосной и мелкозернистой макроструктурой является "однородность" их механических свойств во всех направлениях приложения

#### 11.4. Охлаждение отливок

По окончании кристаллизации металла в КО (форме) начинается период охлаждения отливки - понижение температуры залитого блока до температуры окружающей среды.

Способ охлаждения отливок назначают в зависимости от свойств сплава отливки, габаритных размеров отливки и толщины её стенок, требований к качеству отливки в условиях его естественной конвекции либо ускоряют процесс охлаждения путём принудительного обдува залитых блоков воздухом или душирования их воздухом.

Согласно ОСТ4 ГО 154.095 для проведения безопасной, с точки зрения повреждения отливки, выбивки стальных отливок должны иметь температуру не более 400°С, отливки из магнитно-твёрдых сплавов - температуру не более 600°С, отливки из сплавов на основе меди - температуру не более 100°С, отливки из алюминиевых сплавов - температуру не более 500°С, отливки из алюминия - температуру не более 300°С.

В лите по выплавляемым моделям средне и крупногабаритные отливки охлаждают в форме в условиях естественной конвекции воздуха, поскольку увеличение интенсивности теплоотвода от отливки в процессе её охлаждения приводит к покороблению, но и разрушению (образованию трещин), которые могут вызвать не только её повреждение, но и разрушение (образованию трещин). Кроме того, интенсивное охлаждение отливки приводит к понижению механических свойств сплавов [153].

Исключением из данного правила являются мелкие отливки из углеродистой стали общемашиностроительного назначения. Охлаждение таких отливок, после определения выдержки по окончании заливки, можно интенсифицировать, например, путём обдува залитых КО воздухом в камере охлаждения отливок либо душированием водой.

Согласно данным [153] средняя скорость охлаждения стальных отливок, полученных в КО, заформованных в опорный наполнитель (кварцевый песок) и, предварительно нагретых до 900°С, в среднем составляет -6°С/мин. Те же отливки, но охлаждающиеся без опорного наполнителя, имеют среднюю скорость охлаждения -30°С/мин. Скорость охлаждения отливок, имеют среднюю скорость охлаждения в условиях принудительного движения воздуха, залитых в КО с опорным наполнителем, мод. 675 охлаждение мелких стальных отливок (блоков), извлечённых из наполнителя, проводят путём их душирования водой. Скорость охлаждения отливок в этом случае составляет -80°С/мин. При формовке КО в термостат средняя скорость охлаждения отливок составляет -20°С/мин.

Охлаждение отливок из тугоплавких сплавов сопровождается не только их усадкой и формированием значительных напряжений в отливке, но и физико-химическими явлениями, проходящими на границе КО (форма) - отливка. В частности, для отливок из конструкционных углеродистых сталей и чугунов, охлаждающихся в опорном наполнителе в окислительной газовой среде, характерно образование на поверхности окисленного и обезуглероженного слоя. Причиной образования окисленного и обезуглероженного слоёв на поверхности отливки является кислород, присутствующий в газовой среде, окружающей КО.

Для предупреждения окисления и обезуглероживания поверхности отливок в опорный наполнитель при формовке КО вводят карбюризатор либо, непосредственно вено по окончании заливки КО на её поверхность бросают кусок промасленной ветоши и накрывают стальным копаком, нижний торец которого должен войти в опорный наполнитель формы (если КО заформована в сыпучий опорный наполнитель), либо в песок заливочного плаца, на котором установлена опорная наполнитель), либо в песок заливочного плаца, на котором установлена опорная наполнитель). С этой же целью залитые блоки в опорном наполнителе обдувают природным газом, либо другим углеводородным газом. Для обдува углеводородным газом, например, используют оплоки, оснащенные газораспределительным устройством.

Схема такой оплоки с заформованными в ней КО представлена на рис. 11.77. где обозначены: 1 — оплока, 2 — опорный наполнитель, 3 — КО, 4 — газораспределительное устройство.

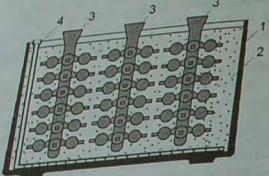


Рис. 11.77. Схема размещения в оплоке газораспределительного устройства

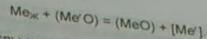
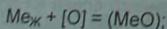
именований отливок — в 8...10 раз), сократить брак по усачной чистоте и чистоту их поверхности.

Химическое взаимодействие между КО и отливкой в процессе охлаждения отливки наблюдается и у высоколегированных хромоникелевых и высокомарганцовистых сталей в случае, когда расплав заливают в окислительной среде в КО, изготовленные на основе двуокиси кремния.

Исследования точечных поверхностных дефектов (питтинговой коррозии), проведенные В.С. Лариным [135] на отливках из стали 10X17H2Л, показывают, что на поверхности отливок в области залегания поверхностных дефектов содержание Si достигает 1,0...1,9% и на отдельных участках — 7...8%. В то же время в области залегания поверхностных дефектов содержание Cr понизилось с 15...18% до 8...12%, действия при питтинговой коррозии отливки входит хромовая шпинель FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, магнетит Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и металл отливки, обеднённый легкоокисляющимися элементами (Cr, Mn, Si).

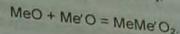
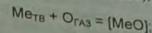
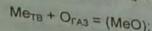
По мнению В.С. Ларина механизм образования питтинговой коррозии состоит в следующем. Расплав, попадая в полость КО, взаимодействует с кислородом газовой атмосферы КО и материалом лицевого слоя КО. При этом образование дефекта (питтинговой коррозии) проходит в несколько этапов.

На первом этапе образования питтинговой коррозии, на поверхности раздела расплав — КО проходят следующие реакции:



Образовавшиеся окислы частично растворяются в расплаве, а частично остаются на границе раздела отливка — КО, являясь зародышами будущих точечных дефектов отливки.

Наиболее интенсивное образование дефектов происходит на втором этапе — после появления твердой корочки металла на поверхности КО. Развитию дефектов, к поверхности затвердевающей и охлаждающейся отливки. В присутствии кислорода в области зародышей дефектов проходят следующие реакции:



В результате между образующимися окислами металлов и кремнезёмом КО образуются химические соединения, находящиеся в твердом или жидком состоянии отливки, за счёт их растворения или увеличения диффузии кислорода к поверхности отливки, создавая при этом условия для ускоренного окисления. Наиболее интенсивное увеличение размеров и числа дефектов происходит при охлаждении поверхности отливки до температуры 1100...1200°С.

С целью предупреждения образования питтинговой коррозии, обезуглероживания и окисления поверхности отливок, следует обеспечить заполнение КО расплава, а также затвердевание и охлаждение отливок в условиях восстановительной наполнителя или термостат.

Отливки из жаропрочных никелевых сплавов, заливаемые и охлаждающиеся в начальный период в условиях вакуума или среде инертного газа, также подвержены процессам химического взаимодействия с КО, если материал лицевого слоя КО обладает кислыми или слабоскислыми свойствами. Например, использование КО изотопленных на основе ГЭС, при получении отливок способом направленной кристаллизации из жаропрочных никелевых сплавов, содержащих углерод, приво- дит к образованию на поверхности отливок металлосидного слоя. Толщина такого слоя может достигать 0,2 мм.

Причиной образования металлосидного слоя является хром, присутствующий в жаропрочных никелевых сплавах. Дело в том, что в условиях вакуума хром вступает во взаимодействие с двуокисью алюминия, содержащейся в лицевом слое КО, с образованием твёрдого раствора. Свидетельством прохождения данного взаимодействия являются продукты данной реакции, придающие поверхностным контактным слоям КО специфический розово-сиреневый цвет. При этом содержание хрома в поверхностном слое отливки понижается, а поверхностные слои КО становятся рыхлыми. В свою очередь, разрыхление контактной поверхности лицевого слоя КО приводит к насыщению поверхностных слоёв отливки частицами электрокорунда ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), о чем можно судить, например, по результатам металлографического исследования шлифа отливки в поляризованном свете при увеличении микроскопа (в поляризованном свете каждый минерал имеет своё характерное свечение) или по результатам проведения рентгеноструктурного анализа включений в сплаве отливки.

Степень взаимодействия никелевого сплава с КО прямо пропорциональна содержанию углерода. Чем выше содержание углерода в сплаве, тем больше толщина образующегося металлооксидного слоя. Следует отметить, что процесс химического взаимодействия между расплавом и КО прекращается при содержании в сплаве углерода менее 0,07% и температуре 1500°C или при содержании углерода менее 0,02% и температуре 1570°C [99].

Разрушение поверхности лицевого слоя КО, в результате его контакта с расплавом, по-видимому, происходит из-за сокращения толщины образующегося металлооксидного слоя на отливках следует повысить температуру прокаливания КО. По данным [99], повышение температуры прокаливания КО с 950...1050°C до 1350°C и более уменьшает содержание свободного диоксида кремния в КО с 6...8% до 3%, что позволяет сократить толщину металлооксидного слоя в отливках с 200 до 30...40 мкм. Отмечается, что электрокорунд керамических стержней, не имеющих в своём составе диоксида кремния, практически является инертным к расплавам жаропрочных никелевых сплавов.

В работе [131] представлены результаты исследований причин образования поверхностных дефектов на турбинных лопатках из жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС30-ВИ, полученных методом направленной кристаллизации в установке ПМП-2. Для литья турбинных лопаток использовали КО, изготовленные в установке ГРЭС с содержанием SiO<sub>2</sub> – 16...20%. Наполнителем огнеупорной суспензии для двух первых слоёв служил дистен-силлиманит, для последующих – смесь порошков электрокорунда.

Авторы отмечают, что доля дефектных лопаток, полученных в установке ПМП-2 по принятой в цехе технологии, составляла 75...82% от числа залитых, причём 32...43% приходилось на брак по поверхностным дефектам – Н.В.

Причиной образования поверхностных Н.В., по мнению авторов, является химическое взаимодействие химически активных компонентов сплава (Al, Ti) с кремнезёмом КО. При этом выделяющийся в результате реакции кремний способен диффундировать в металл, поскольку его максимальная растворимость в никеле при 1600°C достигает 15%, а длительность контакта сплава и КО в условиях получения отливок в установке ПМП-2 составляет 3...5 ч при температуре 1300...1600°C. Источником кремнезёма в КО является как само связующее КО, так и используемый для приготовления огнеупорной суспензии пылевидный дистен-силлиманит, муллитизирующийся при температуре более 1300°C. В совокупности содержание кремнезёма от связующего и дистен-силлиманита в лицевом слое КО достигает 20%.

В жаропрочных никелевых сплавах кремний – элемент нежелательный, поскольку он значительно снижает служебные свойства литых деталей, провоцируя выделение по границам зёрен  $\sigma$ -фазы (CrMo)<sub>2</sub>(NiCo) и Лавес-фазы типа Co<sub>2</sub>Mo, Cr<sub>2</sub>Ti, пластинчатой формы. Выделение указанных фаз в структуре металла отливок приводит не только к понижению жаропрочности и предела длительной прочности сплавов, но и является источником зарождения трещин в отливках [259].

Предотвратить насыщение сплава кремнием возможно путём уменьшения содержания кремнезёма в связующем и наполнителе огнеупорной суспензии.

В связи с этим для изготовления лицевых слоёв КО авторы работы [131] использовали дистен-силлиманит с пониженной химической активностью. Химическую активность дистен-силлиманита понижали за счёт его предварительной муллитизации, для чего исходный дистен-силлиманит смешивали с техническим глинозёмом и обжигали при 1300...1400°C. Использование муллитизированного дистен-

силлиманита в качестве наполнителя огнеупорных суспензий позволило резко снизить глубину насыщения отливок кремнием, что иллюстрируется зависимостями, на рис. 11.78, где обозначены: 1 – дистен-силлиманит в составе суспензии, 2 – муллитизированный дистен-силлиманит или электрокорунд.

Химическую активность лицевого слоя КО можно понизить также путём пропитки КО растворами солей алюминия, например, путём ввода в этих спирто-водорастворимых солей в этилсиликатное связующее. В этом случае при прокаливании КО (при температуре  $\geq 1000^\circ\text{C}$ ) происходит разложение соли до образования двуокиси алюминия и последующее взаимодействие его с кремнезёмом до образования муллита.

В работе [23] представлены результаты исследования свойств бескремнезёмистых КО (БКО), состоящих на 99,5% из оксида алюминия.

Использование БКО для получения отливок из жаропрочных никелевых сплавов ЖС-26, ЖС-32, эвтектических сплавов ВКЛС-10, ВКЛЗ-20, а также сплавов на основе хрома (ВХ-2И, ВХ-4) и титано-ниобиевого сплава ВН-10, при скорости направленной кристаллизации отливок из указанных сплавов процесса 20...25 ч показало, что поверхностные слои сплава ВХ-2И имеют чистую поверхность, при глубине поверхностной зоны взаимодействия около 0,002...0,005 мм. При этом необходимо отметить, что отливки, изготовленные в аналогичных условиях, но в КО на основе электрокорунда и ГРЭС, имеют на поверхности сплошной пригар, а глубина зоны взаимодействия достигает 1,5...2,0 мм.

Глубина изменённого слоя отливок из химически активного титано-ниобиевого сплава ВН-10 с температурой заливки около 2000°C, полученных в БКО, составила 0,28 мм.

Из числа серийно выпускаемых промышленностью отливок наиболее сложный режим охлаждения у турбинных лопаток из жаропрочных никелевых сплавов. Для их охлаждения залитые блоки, непосредственно после извлечения из обогреваемого муфеля вакуумной плавильно-заливочной установки, помещают на 2...4 ч в указанной температуре печи термостата с температурой 750...950°C. После изотермической выдержки при комнатной температуре извлекают из термостата и охлаждают на воздухе до комнатной температуры в условиях естественной конвекции воздуха, не разрушая при этом КО.

Данный режим охлаждения позволяет снизить степень коробления и величину внутренних напряжений турбинных лопаток, уменьшить вероятность образования в них трещин.

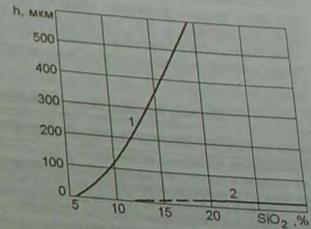


Рис. 11.78. Зависимость глубины насыщения жаропрочного никелевого сплава кремнием от содержания SiO<sub>2</sub> в связующем и пылевидном наполнителе

## Глава 12. ВЫБИВКА, ОБРУБКА И ОЧИСТКА ОТЛИВОК, УДАЛЕНИЕ СТЕРЖНЕЙ

В зависимости от требований, предъявляемых к качеству отливок, их массы, габаритных размеров, свойств используемых сплавов и т.п., используют самые разнообразные схемы проведения финишных технологических операций, в число которых входит выбивка, обрубка и очистка отливок, удаление из отливок стержней, полировка и т.п. Некоторые схемы проведения финишных технологических операций, используемые в цехах по производству отливок методом литья по выплавляемым моделям, приведены в табл. 12.1.

Таблица 12.1  
Схемы проведения финишных технологических операций

Технологическая операция, тип отливки	Условный номер схемы*								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Охлаждение отливок до выбивки:</b>									
на воздухе в термостате до комнатной температуры.....									
на воздухе в опорном наполнителе до 600–750°С.....		+							+
на воздухе в опорном наполнителе до температуры 300–450°С ..		+							+
на воздухе в электротермостате при 750–850°С в течение 2–4 ч				+					
на воздухе в электротермостате до 20–40°С.....									
с последующим охлаждением на воздухе до 20–40°С.....									
<b>Выбивка блоков из опорного наполнителя:</b>									
Охлаждение отливок до комнатной температуры.....									
путём их душирования водой.....		+							
в условиях естественной конвекции воздуха.....									
<b>Удаление залитого блока из термостата</b>									
<b>Выбивка блоков из опорного наполнителя</b>									
Предварительная очистка блоков от КО:									
оббивкой вручную с помощью молотка.....		+	+	+	+	+	+	+	+
на установке ударно-вибрационного типа.....		+	+	+	+	+	+	+	+
на электрогидравлической установке.....									
<b>Обрубка отливок:</b>									
отламыванием на установке ударно-вибрационного типа.....		+	+	+					
отрезкой на металлорежущих станках.....					+	+	+	+	
отламыванием с помощью молотка.....					+	+			
отрезкой абразивным кругом.....							+	+	+
отрезкой на анодно-механическом станке.....							+	+	+
отрезкой алмазной резкой и т.п. ....							+	+	+
газопламенной резкой и дисковой пилой.....									
отрезкой ленточной или дисковой пилой.....									
отрезкой механической ножовкой.....									
<b>Окончательная очистка отливок от КО путём их:</b>									
галтовки и выщелачивания.....		+	+	+	+	+	+	+	+
абразивоструйной, дробеструйной, дробеструйной очистки.....									
выщелачивания.....									
<b>Травление отливок в кислоте (удаление "альфированного" слоя)</b>									
Удаление из отливок керамических стержней									
Зачистка или обеска на отливках остатков питателей		+	+	+	+	+	+	+	+
Ремонт отливок		+	+	+	+	+	+	+	+

Примечание. \* 1 – отливки мелкие стальные, изготавливаемые в условиях массового производства литья при формовке КО в опорный наполнитель; 2 – отливки мелкие стальные, изготавливаемые в условиях мелкосерийного или серийного производства литья при формовке КО в опорный наполнитель; 3 – отливки мелкие стальные, изготавливаемые в условиях мелкосерийного или серийного производства литья при заливке КО на воздухе без опорного наполнителя; 4 – средне- и крупногабаритные отливки из сплавов на основе железа, никеля, кобальта меди и т.п. (открытая плавка сплава, формовка в опорный наполнитель) в условиях мелкосерийного и серийного производства литья; 5 – средне- и крупногабаритные отливки из сплавов на основе железа, никеля, кобальта, меди и т.п. (открытая плавка сплава, заливка КО на воздухе, без опорного наполнителя) в условиях мелкосерийного и серийного производства литья; 6 – средне- и крупногабаритные отливки из сплавов на основе железа, ни-

келя, кобальта, меди и т.п. (открытая плавка сплава, упаковка КО в термостат) в условиях мелкосерийного и серийного производства литья; 7 – средне- и крупногабаритные отливки из сплавов на основе никеля, кобальта и т.п. (плавка и заливка в вакууме) в условиях мелкосерийного и серийного производства литья; 8 – отливки из сплавов на основе алюминия, магния; 9 – отливки из титановых сплавов.

### Выбивка и обрубка отливок

Отливки – это процесс удаления полностью затвердевшей и охлажденной отливки из КО (формы).

В цехах единичного, мелкосерийного и серийного производства литья отливки и охлажденные до комнатной температуры блоки из опорного наполнителя выбивают вручную с последующим просеиванием материала наполнителя выбивочного возвратом на участок формовки КО для повторного использования.

В условиях крупносерийного и массового производства мелких стальных отливок для выбивки заливочных блоков из сыпучего материала наполнителя, используют выбивные решетки и поворотные машины (кантователи опок).

Как правило, и выбивные решетки, и кантователи опок используют в составе механизма для просеивания и возврата сыпучего опорного наполнителя в состав сток формовки КО. Использование механизма для выбивки заливочных блоков из сыпучего опорного наполнителя позволяет проводить выбивку блоков при их средней температуре до 750°С. Однако при этом следует учитывать, что выбивка блодами, имеющих высокую температуру, сопряжена с высокой степенью вероятности или друг о друга.

В случае, если заливку КО мелких стальных отливок проводят на автоматизированной линии карусельного типа, заливочные блоки, после извлечения из опорного наполнителя, охлаждают на подвесках конвейера до комнатной температуры путём их душирования водой.

После охлаждения проводят первичную очистку блоков, в результате которой с 90% и более площади их поверхности удаляется КО. После первичной очистки, как правило, на поверхности блока остаются частички КО в острых внутренних углах стиях, пазах и т.п.).

В условиях единичного, мелкосерийного и серийного производства отливок первичную очистку блоков осуществляют вручную, путём "лёгких" ударов молотка по элементам ЛПС блока.

В условиях крупносерийного и массового производства мелких стальных отливок, имеющих ЛПС типа I – III, первичную очистку блоков осуществляют на ударно-вибрационных установках отделения керамики.

В установке в процессе ударно-вибрационного воздействия на блок в течение 2...10 мин, помимо удаления с его поверхности КО, происходит и отламывание отливок от питателей. Такой способ отделения отливок зачастую приводит к их разрушению, в связи с чем в промышленных условиях длительность ударно-вибрационного воздействия на блок ограничивают 30 с.

К числу установок ударно-вибрационного действия относятся установки мод. 6А92 и мод. 67101, работающие в ручном режиме (Изготовитель – ГУП "Тираспольский завод литейных машин им. С.М.Кирова", Молдова). Внешний вид установки для удаления КО с поверхности блока пред-



Рис. 12.1. Установка мод. 67101

ставлен на рис. 12.1, а технические параметры установок мод. 6А92 и мод. 67101 приведены в табл. 12.2.

Параметры	Значения	
	мод. 6А92	мод. 67101
Наибольшие габаритные размеры обрабатываемого блока, мм диаметр-длина	400х500	100
Максимальная производительность, блоков/ч	2,5	0,5
Рабочее давление сжатого воздуха, МПа	835х950х2500	1240х955х3135
Расход сжатого воздуха (при давлении 0,5 МПа), м <sup>3</sup> /ч	1355	2900
Габаритные размеры, мм: длина-ширина-высота		
Масса, кг		

Первичную очистку отливок ответственного, особо ответственного или специального назначения, полученных, например, в электрокорундовых КО, осуществляют вручную (с использованием молотка) либо в электрогидравлической установке. Установка для электрогидравлической выбивки предназначена для очистки в воде средне и крупногабаритных отливок из чугуна, стали и цветных сплавов с помощью энергии высоковольтных электрических разрядов. В основном, электрогидравлические установки используют в литейных цехах с индивидуальным, мелкосерийным и серийным производством средне- и крупногабаритного литья.

Для очистки в электрогидравлической установке блок помещают в контейнер установки, который вместе с блоком погружают в воду. После этого в воду погружают и электрод (электроды), что схематично представлено на рис. 12.2.



Рис. 12.2. Принципиальная схема установки электрогидравлической выбивки отливок (а) и схема воздействия электрического разряда (б): 1 – электрод; 2 – вода; 3 – разрядный канал; 4 – КО; 5 – отливка; 6 – корзина

Для очистки между электродом и очищаемым блоком создают электрический разряд от генератора импульсных токов (см. рис. 12.2,а). Возбуждение электрического разряда в воде, между электродом и отливкой, сопровождается высоким импульсным давлением (с амплитудой в несколько десятков мегапаскалей), интенсивными нестационарными потоками воды (со скоростями, достигающими сотен метров в секунду), развитием мощных кавитационных процессов, а также резонансными колебаниями, позволяющими осуществлять отслаивание частиц формы от поверхности отливки. Именно эти факторы и определяют то механическое воздействие на КО (форму), которое приводит к её разрушению (см. рис. 12.2,б). При

этом обязательным условием нормальной работы установки является использование технической воды с удельным сопротивлением не менее 1500 Ом/см. К числу установок, предназначенных для электрогидравлического разрушения формы, относятся установки серии "Искра", установка мод. 36121А и др., технические параметры которых приведены в табл. 12.3.

Технические параметры установок электрогидравлической очистки отливок

Параметры	Значения		
	мод. 36121А	"Искра-28"	"Искра-36"
Тип установки	туликовая	туликовая	туликовая
Габаритные размеры очищаемых отливок, мм: длина-ширина-высота	1800х1000х700	630х500х300	1250х800х1000
Наибольшая масса загрузки отливок, т	2,5	0,16	0,315
Расход электроэнергии на 1 т очищаемых отливок, кВт·ч/т	6,0	10	11,7
Площадь, занимаемая установкой, м <sup>2</sup>	58,4	120	90
Масса, т	12,9	36	31

По окончании первичной очистки блоков осуществляют обрубку отливок. Обрубка отливок – процесс отделения от отливки прирубей, литников, выпотделелей от питателей (стояков) в условиях мелкосерийного производства литья отливкам, либо путём отрезки отливок на металлорежущих станках (токарных, фрезерных, шлифовальных) или с помощью ручной ножовки по металлу.

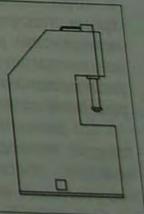
В условиях крупносерийного и массового производства мелкого литья отделение отливок от питателей путём отламывания осуществляют на прессах. Обрубку небольшими ножовками, при помощи газопламенной и дисковыми пилами, механизми абразивными кругами и т.п.

Как было отмечено выше, в условиях крупносерийного и массового производства мелких стальных и чугунных отливок отделение отливок от ЛПС типа I (звеньевая сборка моделей), со стояком круглого сечения, осуществляют путём их отламывания на гидравлическом прессе мод. 6А93 (Изготовитель – ГУП "Тираспольский завод литейных машин им. С.М.Кирова". Молдова).

Технические параметры и схема пресса мод. 6А93 приведены в табл. 12.4.

Технические параметры и схема пресса мод. 6А93

Параметры	Значения
Наибольшие габаритные размеры блока, мм: диаметр-длина	400х500
Наибольшая производительность, блоков/ч	100
Наибольшее усилие, развиваемое цилиндрами, кН: верхним подпора	630
Расход электроэнергии, кВт·ч/ч, не более	50
Габаритные размеры, мм: длина-ширина-высота	24
Масса, кг	2080х1000х3350
	5150



Для отламывания отливок от питателей (см. рис. 12.3) блок помещают в пресс между упором рабочего цилиндра 1 и штоком подпорного цилиндра 4. После этого

упор рабочего цилиндра "проталкивает" сток блока через фильеру 2, одновременно перемещая шток подпорного цилиндра (на рис. 12.3 направление движения упора рабочего цилиндра обозначено стрелкой). В результате "проталкивания" стока блока через фильеру отливки 3, наталкиваясь на кромку фильеры 2, отламываются от питателя. Применяемая фильера 2 имеет определяющую калиброванное отверстие, что позволяет отламывать отливки 3 от блока, а на стояке оставлять лишь остатки питателей. По завершении процесса отделения отливки шток подпорного цилиндра выталкивает сток из фильеры. Впоследствии сток и отливки вручную удаляют из рабочей зоны пресса.

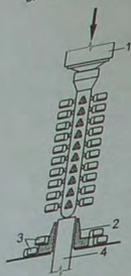


Рис. 12.3. Схема отделения отливки от стояка на прессе

Газопламенную резку применяют в том случае, когда оказывает влияние на её качество либо когда не оказывает влияния на её качество либо когда поперечное сечение. Анодно-механическую резку используют в том случае, когда отделяемый от отливки элемент ЛПС имеет достаточное поперечное сечение и невозможно использовать другие способы отделения. Сущность анодно-механического способа реза осуществляется в результате электрохимического и теплового воздействия электрического тока, а также механического воздействия и разрезаемый металл. При этом режущая головка станка изолирована от станины и состоит из быстровращающегося электрода 1 (дискового или ленточного), закреплённого в шпинделе.

Для реза отливку 3 закрепляют на станине анодно-механического станка, а к электроду 1 и отливке 3 подводят электрический ток. Во избежание короткого замыкания в обрыве разовавшейся электрической цепи, в пространство между электродом и разрезаемым блоком подают из патрубков 2 электролит (водный раствор жидкого стекла).

При быстром вращении (движении) электрода электролит фрагментарно удаляется с поверхности реза электрода, что приводит к концентрации и переносу значительной энергии на данном локальном участке реза, расплавлению сплава на данном микроучастке и "выносу" образовавшегося расплава из зоны реза вращающимся электродом.

По данным М.А. Халдея и П.А. Экимова, отрезку элементов ЛПС от отливки следует проводить на постоянном токе, что, по сравнению с отрезкой на переменном токе, обеспечивает увеличение производительности в 1,25 раза и снижает износ режущего инструмента в 2,5 раза.

В литейных цехах для выполнения анодно-механической резы используют станки различных конструкций, производства как отечественных, так и зарубежных предприятий-изготовителей. Одним из наиболее распространённых станков анод-

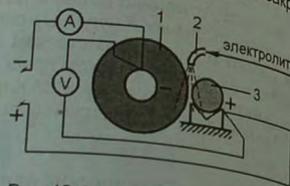


Рис. 12.4. Принципиальная схема анодно-механической резы

но-механической резы в цехах литья по выплавляемым моделям является станок мод. СНО 645В, технические параметры которого приведены в табл. 12.5.

Технические параметры станка мод. СНО 645В

Параметры	Значения
Производительность, блоков/ч:	
по стали / по алюминию	45 / 80
Наибольшая длина отделяемого стояка, мм	350
Окружная скорость режущего инструмента, м/с	3,50
Скорость подачи режущего инструмента, м/мин	7,3
Система подачи режущего инструмента	0-2
Рабочая среда	Гидравлическая
Потребляемая мощность, кВт	Жидкое стекло плотностью 1,2 г/см <sup>3</sup>
Ток	10,5
Напряжение, В	Постоянный
Сила тока, А	24
Габаритные размеры, мм	600
Масса, кг	1200×1000×2225
	840

Для отрезки от ЛПС средних и крупных отливок, изготовленных из тугоплавких сплавов (сплавов на основе железа, никеля, кобальта и т.п.), наиболее широко используют отрезку абразивным кругом толщина реза которого может составлять в зависимости от толщины используемого абразивного круга, от 3 до 8 мм.

Технические параметры ленточно-пильного станка мод. ЛС-80-4

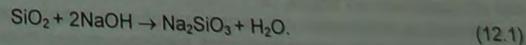
Параметры	Значения
Наибольшая высота пропила, мм	570
Ширина пропила, мм	715
Мощность, кВт	3,8
Габаритные размеры, мм	1809×943×2650

параметры ленточно-пильного станка мод. ЛС-80-4 (Изготовитель - завод "Кировский металлург", г. Киров, Россия) приведены в табл. 12.6.

После отделения от ЛПС отливки подвергают окончательной очистке.

**Окончательная очистка отливок** - процесс удаления с поверхности отливки окислов, пригара, остатков КО и т.п. Для очистки мелких стальных отливок используют химико-термические методы, и товаров широкого потребления (используемым) воздействием. То есть очистку проводят путём галтовки отливок в водной щёлочной среде при температуре 105...110°C, используя для этого барабаны периодического или непрерывного действия, либо при температуре 180...230°C, если выщелачивание проводят при статическом состоянии отливок.

Как правило, химико-термическую очистку отливок (выщелачивание) проводят в горячем водном растворе едкого натра. При этом кремнезём КО взаимодействует с едким натром с образованием жидкого стекла и воды по реакции:



Для выщелачивания остатков КО также можно использовать и КОН. В этом случае удельная скорость выщелачивания, по сравнению с выщелачиванием в растворе NaOH, возрастает. Однако более высокая стоимость едкого кали, по сравне-

нию с едким натром, сдерживает широкое использование КОН для выщелачивания остатков КО с поверхности отливок.

С целью увеличения скорости выщелачивания водные растворы щелочей нагревают до температуры кипения и поддерживают в растворе определенную концентрацию едкого натра или калия (35...45%, по массе). В процессе выщелачивания, по мере увеличения в растворе продуктов химической реакции и уменьшения концентрации щелочи, величина водородного показателя реакции (рН) практически не изменяется, но при этом понижается удельная скорость выщелачивания. Поэтому состав водного раствора щелочи, используемого для выщелачивания, периодически контролируют и при необходимости корректируют или полностью заменяют раствор.

Согласно ОСТ4 ГО 054.095 расчёт необходимого количества твёрдой щелочи для получения заданного объёма раствора производят по формуле (кг):

$$M_{щ} = \frac{A \cdot V \cdot \rho}{B}, \quad (12.2)$$

где  $A$  – концентрация едкого кали или едкого натра в растворе, %;  $V$  – заданный объём раствора, л;  $\rho$  – плотность раствора заданной концентрации  $K_p$ , кг/л.  
Для концентраций раствора щелочи (%  $K_p$ ) от 5 до 50% значения величины  $\rho$  можно рассчитать по уравнениям:

$\rho = 0,010 \cdot K_p + 1$  – для раствора КОН;

$\rho = 0,011 \cdot K_p + 1$  – для раствора NaOH.

Расчёт добавки твёрдой щелочи на заданный объём раствора (при истощении раствора) производят по формуле (кг):

$$M_{щ}^1 = \frac{(b-d) \cdot V_1 \cdot \rho}{B}, \quad (12.3)$$

где  $b$  – требуемая концентрация щелочи в растворе, %;  $d$  – действительная концентрация щелочи в растворе, %;  $V_1$  – количество раствора с учётом выведенной щелочи, л;  $B$  – концентрация едкого кали или едкого натра в твёрдой щелочи, %.

Расчёт добавки воды (в случае превышения концентрации щелочи) производят по формуле (л):

$$V_B = V_2 \cdot \rho \cdot \left( \frac{m}{n} - 1 \right), \quad (12.4)$$

где  $V_2$  – количество раствора с учётом вводимой воды, л;  $m$  – концентрация щелочи в растворе до его разбавления водой, %;  $n$  – концентрация щелочи в растворе после его разбавления водой, %.

Помимо оптимальной концентрации щелочи в растворе и её повышенной температуры, интенсификации процесса выщелачивания также способствует механическое перемешивание раствора, контактирующего с поверхностью очищаемых отливок. Поэтому в промышленных установках выщелачивания остатков КО из от-

ливок предусмотрено перемешивание щелочного раствора, достигаемое в результате совмещения процесса выщелачивания и галтовки отливок в растворе. К числу таких установок относится установка барабанного типа, схема которой представлена на рис. 12.5.

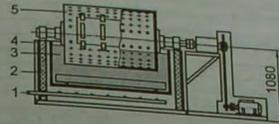


Рис. 12.5. Съёмный очистной барабан

Для выщелачивания (см. рис. 12.5) отливки помещают в барабан 5, который впоследствии краном-балкой устанавливают в обогреваемую ванну со щелочью 3. Установку барабана осуществляют в разёмные подшипники, размещённые на раме 4. Внутри рамы установки выполнена теплоизоляция 2. Нагрев водного раствора щелочи осуществляется с помощью газовых горелок 1.

В таком барабане, длительность выщелачивания остатков КО, изготовленной на основе кварцевого песка, кварца для интенсификации процесса выщелачивания мелких отливок, вместе с отливками (15...30 мм) абразивного материала.

После окончания выщелачивания барабан с помощью крана-балки извлекают из ванны со щелочным раствором и устанавливают в аналогичную установку с пробан извлекают из ванны с водой и удаляют из него отливки.

Область использования установок выщелачивания вышеописанной конструкции – производство мелких стальных отливок общемашиностроительного назначения и товаров народного потребления в условиях мелкосерийного и серийного производства.

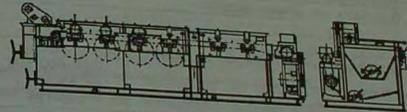


Рис. 12.6. Установка мод. 67К531

При производстве стальных отливок в условиях крупносерийного производства используют установки выщелачивания с несколькими барабанами. К числу таких установок относится установка мод. 67К531 (Изготовитель ГУП "Тираспольский завод

литейных машин им. С.М.Кирова". Молдова), схема которой представлена на рис. 12.6.

Установка мод. 67К531 обеспечивает выполнение следующих технологических операций:

- нагрев щелочного раствора до температуры кипения (115...125°C) и промывочной воды (до 60...90°C) электронагревателями;
- удаление остатков КО в ванне выщелачивания:

- а) с мелких и средних отливок – во вращающихся барабанах, предварительно загруженных отливками;

- б) с крупных отливок – в контейнере, предварительно загруженном отливками;
- промывку отливок после перегрузки барабанов или контейнера из ванны выщелачивания в ванну промывки;

- периодическое механизированное удаление шлама и остатков КО без отработки технологического процесса.

Технические параметры установки мод. 67К531

Параметры	Значения
Наибольшая производительность (при загрузке в барабаны 65 кг отливок с продолжительностью выщелачивания 2 ч), кг/ч	130
Время обработки, ч. в ванне выщелачивания / в ванне промывки	2 / 0,3-0,6
Время обработки, ч. в ванне выщелачивания / в ванне промывки	30-35
Концентрация щелочного раствора, %	115-125
Температура щелочного раствора, °С	60-90
Температура воды в ванне промывки / промывки	1,5 / 0,6
Температура воды в ванне выщелачивания / промывки	5 / 95
Рабочий объем ванны, м <sup>3</sup> выщелачивания / промывки	5560 / 1970 / 2140
Рабочий объем ванны, м <sup>3</sup> выщелачивания / промывки	2650
Рабочая мощность, кВт: электродвигателей / электронагревателей	
Установленная мощность, кВт: электродвигателей / электронагревателей	
Установленные размеры, мм: длина×ширина×высота	
Габаритные размеры, мм: длина×ширина×высота	
Масса, кг	

Аналогичной по конструкции установке мод. 67К531 является установка мод. АВА197.0Л (Изготовитель – ГУП «Тираспольский завод литейных машин им. С.М.Кирова», Молдова). Технические параметры установки мод. АВА 197.0Л приведены в табл. 12.8.

Технические параметры установки мод. АВА 197.0Л

Параметры	Значения
Производительность, кг/ч, не менее:	
в барабанах при массе отливок в одном барабане 65 кг и времени выщелачивания 2 ч	130
в контейнере при средней массе партии крупногабаритных отливок 600 кг и времени выщелачивания 12 ч	110
Количество барабанов, шт. в зоне выщелачивания / в зоне промывки	4 / 2
Габаритные размеры барабана, мм: диаметр×длина	450×560
Габаритные размеры грузочного окна, барабана, мм: длина×ширина	500×200
Габаритные размеры барабана, об/мин	2,4
Частота вращения контейнеров	3
Количество контейнеров	
Габаритные размеры контейнера для крупногабаритных отливок, мм, не более:	
длина×ширина×высота	1000×600×800
длина×ширина×высота	30-35
Концентрация щелочного раствора, %	115-125
Температура щелочного раствора, °С	60-90
Температура воды в ванне промывки / промывки	1,5 / 0,6
Температура воды в ванне выщелачивания / промывки	5 / 95
Рабочий объем ванны, м <sup>3</sup> : выщелачивания / промывки	5560 / 1970 / 2140
Рабочий объем ванны, м <sup>3</sup> : выщелачивания / промывки	2650
Расход пара при давлении 0,5 МПа, кг/ч, не более	2,0
Расход воды, м <sup>3</sup> /ч	4,4
Установленная мощность, кВт	
Установленная мощность, кВт	
Установленные размеры, мм: длина×ширина×высота	
Габаритные размеры, мм: длина×ширина×высота	
Масса, кг	3300

Автомат мод. 6Б95 (Изготовитель – ГУП «Тираспольский завод литейных машин им. С.М.Кирова», Молдова) предназначен для выщелачивания остатков КО с поверхности мелкого стального литья общемашиностроительного назначения в условиях крупносерийного и массового производства мелких стальных отливок (см. рис. 12.7).

При выщелачивании автомат выполняет следующие технологические операции:

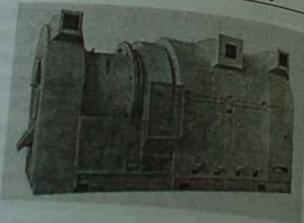


Рис. 12.7. Автомат мод. 6Б95

- загрузку отливок в барабан при его непрерывном вращении;
- перемещение отливок по винтовой спирали барабана вдоль его оси и их перемешивание в растворе щелочи;
- выщелачивание отливок и удаление шлама;
- предварительную и окончательную промывку отливок;
- выгрузку очищенных отливок из автомата.

Технические параметры автомата мод. 6Б95 приведены в табл. 12.9.

Технические параметры автомата мод. 6Б95

Таблица 12.9

Параметры	Значения
Наибольшие габаритные размеры обрабатываемых отливок, мм: длина×ширина×высота	140×140×140
Наибольшая производительность, кг/ч	250*
Частота вращения барабана, об/мин	0,7±0,1
Полное время обработки партии отливок (при массе партии отливок не более 80 кг), ч	от 2,5 до 5
Расход воды на технологические цели, м <sup>3</sup> /ч, не более	2
Расход газа при давлении 831,5 Па (85 мм вод. ст.), м <sup>3</sup> /ч, не более	27
Расход электроэнергии, кВт/ч	2,8
Габаритные размеры, мм: длина×ширина×высота	5800×2500×2800
Масса, кг	10650

Примечание. \* – Производительность, получаемая при обработке стального литья с развотной поверхностью и глубиной впадин (отверстия) не более 1,5...2,0 ширины впадин (диаметров отверстий).

Наибольшая производительность вышеописанных установок выщелачивания достигается при выполнении следующих условий:

- КО изготовлена на основе ГРЭС, кварцевого песка и пылевидного кварца;
- выщелачиванию предшествовало разрушение КО на установке типа 6А92 или аналогичных установках с удалением с поверхности отливок не менее 85% исходной массы КО;
- концентрация NaOH в водном растворе – 35...45% (по массе);
- время загрузки отливок в установку – 40 с.

Интенсификация процесса выщелачивания отливок путём их галтовки в водном растворе щёлочи приводит не только к очистке поверхности отливок, но и к улучшению качества их поверхности (появлению на поверхности отливок царапин, «заболев», «заоваливание» острых кромок отливок), что допустимо не во всех случаях. Кроме того, выщелачивание в условиях галтовки допустимо только для мелких отливок. Если отливка средне- или крупногабаритна, если не допускается «заоваливание» её острых кромок и к качеству поверхности отливки предъявляются самые высокие требования, если сплав отливки чрезмерно хрупок или имеет низкую твёрдость, если отливка тонкостенна, но массивна, выщелачивание следует проводить в условиях, предупреждающих какие-либо виды соударений отливок между собой или с элементами конструкции установки выщелачивания. То есть выщелачивание отливок необходимо проводить в их статичном или фиксированном, относительно друг друга, состоянии.

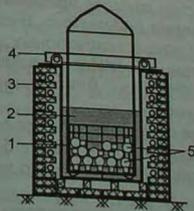


Рис. 12.8. Схема печи шахтного типа для выщелачивания остатков КО с поверхности отливок

Для выщелачивания отливок в статичном состоянии используют нагревательные печи шахтного типа. В частности, на рис. 12.8 представлена схема печи шахтного

типа 3, предназначенная для выщелачивания отливок 5 в расплаве гидроокиси натрия, калия или их смеси 2, предварительно нагретой до 650...850°C и содержащей (по массе) 2...4% жёлтой кровяной соли. Жёлтую кровяную соль добавляют в расплав во избежание корроирования стальных отливок из конструкционной стали. Длительность выщелачивания остатков КО из отливок в расплаве щелочей составляет 15...35 мин (в случае предварительного нагрева отливок в корзине до 250...280°C).

В случае использования щелочного расплава, состоящего из 42% NaOH и 58% KOH, температуру выщелачивания понижают до 450...500°C. В некоторых случаях для очистки стальных отливок используют расплав, состоящий из 96% NaOH и 4% Na [80].

Для выщелачивания отливки помещают в стальную корзину 1. Во избежание значительных тепловых потерь, на время выщелачивания печь накрывают крышкой 4. По окончании выщелачивания отливки вместе с корзиной извлекают из расплава, охлаждают до комнатной температуры и тщательно промывают в проточной воде.

Для интенсификации процесса химико-термической очистки отливок в расплаве щелочей вводят 2...4% (по массе) пероксида натрия ( $\text{Na}_2\text{O}_2$ ), что позволяет увеличить удельную скорость выщелачивания в 4...8 раз [189].

Следует отметить, что выщелачивание остатков КО в щелочном расплаве сопровождается интенсивным выделением водяного пара, приводящего к вспениванию щелочного расплава. Поэтому глубину тигля со щелочным расплавом рассчитывают с учётом данного эффекта, во избежание вытекания щелочи из тигля.

В некоторых случаях процесс выщелачивания отливок из конструктивных сталей совмещают с процессом их термообработки. Например, согласно технологии химико-термической очистки отливок, разработанной в АНИТИМ (г. Барнаул), стальные отливки нагревают до 200...250°C и погружают в расплав солей, нагретый до 950...1000°C. Расплав солей представляет собой раствор (по массе) 15% KCl и 3% NaF в кальцинированной соде. Во избежание обезуглероживания поверхностных слоёв отливок в процессе выщелачивания, в раствор замешивают поверхность древесного угля. После полного удаления остатков КО с поверхности отливок (длительность процесса от 10 до 45 мин) отливки извлекают из расплава и помещают на 10...45 мин в расплав солей  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и KCl эвтектического состава при температуре 650...680°C. Впоследствии отливки извлекают из расплава солей, нагретой до 80...90°C и промывают водой, нагретой до аналогичной температуры, охлаждают.

Все вышеописанные способы химико-термической очистки отливок применимы для КО, изготовленных на основе кварцевого песка или кварца плавяного. В случае когда удаляемая КО изготовлена на основе алюмосиликатных огнеупорных материалов (шамот, муллит), согласно технологии разработанной НИИАвотпромом, удаление КО проводят в расплаве соды, содержащем 28...32% буры. Длительность выщелачивания в этом случае при 950...970°C составляет около 5 мин.

После выщелачивания, для удаления продуктов реакции с поверхности отливок их помещают при 650...670°C в расплав, состоящий (по массе) из 50% соды и 50% хлористого калия. После очистки в указанном растворе отливки охлаждают до комнатной температуры и промывают водой.

Помимо химико-термической очистки отливок в цехах литья по выплавляемым моделям используют очистку электрохимической.

Электрохимическую очистку отливок проводят либо в расплаве щелочи (KOH, NaOH, 75% KOH + 25% NaOH и т.п.), либо в расплаве щелочи с добавкой определённых солей (например, по массе, 97% NaOH и 7% NaCl), либо в расплаве, для

приготовления которого используют 90% NaOH и 10%  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , при плотности тока 6...10 А/дм<sup>2</sup> [80] и температуре расплава 450...500°C. Для проведения электрохимической очистки отливки фиксируют на подвеске и опускают в расплав щелочи, после чего включают генератор постоянного тока ( $I=6, 12 \text{ В, } I=800...1200 \text{ А}$ ). Величину силы тока регулируют путём изменения расстояния между очищаемой отливкой и днищем поддона.

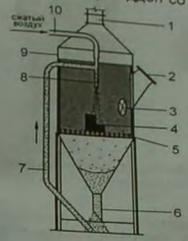


Рис. 12.9. Схема абразивоструйной (пескоструйной) установки эжекционного типа

Поскольку поддон со щелочью подключен к положительному полюсу генератора, а подвеска - к отрицательному полюсу, то в результате направленности и высокой плотности тока поверхности отливки очищаются в течение 10...15 мин. После горячей воде в течение ~10 мин.

Отливки ответственного назначения, в основном, очищают в абразивоструйных, гидросекоструйных, дробеструйных и дробеструйных камерах путём химико-термической или электрохимической обработки, и т.п. Абразивоструйные (пескоструйные) отливки производят в и барабанах.

Принцип работы абразивоструйной (пескоструйной) установки эжекционного типа состоит в том, что очистка поверхности отливки или ЛПС осуществляется в результате механического воздействия частиц абразивного материала на очищаемую поверхность. То есть частицы абразивного материала, двигаясь в струе сжатого воздуха, приобретают достаточно высокую скорость и, ударяясь об очищаемую поверхность, скалывают или истирают материал, покрывающий поверхность отливки.

На рис. 12.9 представлена принципиальная схема абразивоструйной (пескоструйной) установки эжекционного типа, где обозначены: 1 - патрубок вытяжной вентиляции, 2 - смотровое окно, 3 - технологическое окно, 4 - отливка, 5 - стальная решётка, 6 - абразивный материал, 7 - заборный патрубок, 8 - сопло, 9 - корпус установки, 10 - патрубок подвода сжатого воздуха в установку. Изнутри, поверхность рабочей камеры установки покрыта слоем резины (на смотрен зажим для крепления стекла в случае необходимости его замены).

Представленная на рис. 12.9 установка работает следующим образом. Очищаемую отливку 4 помещают в установку и, включив вытяжную вентиляцию, подаю сжатый воздух через патрубок 10. С момента включения подачи сжатого воздуха в установку абразивный материал 6 из нижней части установки начинает засасываться в заборный патрубок 7, откуда поступает в сопло установки 8. Из сопла 8 вместе с воздушным абразивный материал выбрасывается в направлении очищаемой поверхности. Частицы абразивного материала, столкнувшись с поверхностью отливки, теряют свою кинетическую энергию и вместе с частицами, сколотыми с поверхности отливки, через решётку падают в приёмный конус установки, чтобы снова повторить вышеописанный путь.

Сжатый воздух вместе с пылевидной фракцией абразивного материала и микрочастицами, сколотыми с поверхности отливки, выносятся из рабочего пространства установки вытяжной вентиляцией через патрубок 1.

По мере очистки поверхности отливкой манипулируют, подставляя её под воздушную-абразивную струю различными сторонами. Наблюдение за ходом процесса

очистки осуществляют через смотровое окно 2, а необходимым поворот отливки проводят вручную, используя технологические окна 3 и защиту рук специальными проводящими перчатками.

В абразивоструйной установке в качестве абразивного материала используют резиновыми перчатками. Для очистки отливок из алюминия, размера и выбор абразивного материала, карбид кремния и т.п. В абразивоструйных установках используют алюминиевый песок сухой кварцевый песок, чёрный или белый электрокорунд, карбид кремния и т.п. Для очистки отливок от твердости и шероховатости ее поверхности. Для получения очищаемой отливки и требований к форме его части зависит от твердости сплава очищаемой отливки и требований к шероховатости ее поверхности. Для получения отливки с относительно низкой твердостью, твердость абразивного материала и размер его части должны быть тем меньше, чем ниже требования по шероховатости и выше требования по твердости отливки к ее поверхности.

В литейных цехах используют абразивоструйные установки, как собственной конструкции, так и изготовленные специализированными предприятиями. В частности, на рис. 12.10 представлены установки абразивоструйные (пескоструйные) мод. КСО-80-и/ф и КСО-110и (Изготовитель – ЗАО "ЭКОНИКА -Техно", г. Москва). Технические параметры установок мод. КСО-80-и/ф и КСО-110-и приведены в табл. 12.10.



Рис. 12.10. Установки абразивоструйные мод. КСО-80-и/ф (а) и КСО-110-и (б)

#### Технические параметры абразивоструйных установок

Марка	Давление воздуха, атм	Расход воздуха, м³/мин	Объем бункера, л	Пр., м³/ч	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
КСО-80-и/ф	3,5-7	0,1-1,2	80	1-3	970×825×1600	130
КСО-110и	3,5-7	0,2-3,0	110	1-3	1600×940×1060	305

Примечание. Пр. – производительность.

Установки для струйной очистки отливок фирмы SAPI (Германия) предназначены для очистки различных поверхностей, снятия ржавчины, матирования, снятия заусениц и полирования. Технические параметры некоторых струйных установок (камер), производимых фирмой SAPI, представлены в табл. 12.11.

#### Технические параметры струйных установок

Модель установок	Размеры пескоструйной камеры, Д х Ш х В*, м	Объем струйного материала, л	Расход воздуха, м³/мин	Рабочее давление, бар	Напряжение / потребляемая мощность, В / Вт
Widder 70	0,7х0,6х0,6	150	0,3-0,8	2-12	230 / 40
Widder 100	1х0,6х0,6	150	0,3-0,8	2-12	230 / 40
Elch 100	1х0,7х0,75	150	0,3-1,0	2-12	230 / 40
Buffel 140	1,35х0,95х0,9	300	0,6-2,0	2-12	230 / 80
Buffel 180	1,75х1,4х0,9	300	0,6-2,0	2-12	230 / 80
Elefant 140/120	1,35х1,05х0,9	500	1,5	3-6	230 / 80
Elefant 140/140	1,35х1,25х0,9	500	1,5	3-6	230 / 80

Примечание. \* Д – длина, Ш – ширина, В – высота.

Помимо очистки в абразивоструйных установках, очистку отливок в цехах литейного производства также проводят в пескоструйных установках. В частности, для очистки литых в условиях мелкосерийного и серийного производства фирмой GOSTOL-T.S.T. d.o.o. Tolmin (Словения) производят пескоструйные установки с вращающимся столом, технические параметры которых приведены в табл. 12.12.

#### Технические параметры пескоструйных установок фирмы GOSTOL

Параметр	Значения		
	K2-850	K2-1200	K2-1600/2
Грузоподъемность стола, кг	100	500	1000
Максимальная высота очищаемой отливки, мм	150	350	600
Диаметр рабочего стола, мм	650	1200	1600
Общая установленная мощность, кВт	9	9	18
Диаметр турбины, мм	300	300	300
Мощность турбины, кВт	5,5	7,5	2×7,5
Масса установок, кг	980	3600	6100
Габаритные размеры, мм:			
длина	1297	1800	2655
ширина	1083	1857	2500
высота	2550	3450	4450



От пригара и окислы отливки также очищают в галтовочных барабанах, основным недостатком которых, как было отмечено выше, является "заокалинация" кромок отливок.

Для повышения эффективности галтовки вместе с отливками в барабан могут загружать определенное количество абразива и компаунда. При этом в процессе галтовки, помимо удаления с поверхности окислы, ржавчины и пригара, могут решаться задачи по снятию заусениц и облоя отливок, грубого и тонкого шлифования, дорнования, гляцевания, закругления ("заокалинация") кромок, очистки, обезжиривания, консервации и полирования поверхности отливок.

Очистку отливок в дробеструйных установках (аналог пескоструйной установки) проводят значительно реже, чем в барабанах и установках дробеметной очистки, что объясняется низкой производительностью дробеструйных установок.

Принципиальная схема дробеметного барабана представлена на рис. 12.11. Для очистки отливки загружают в барабан. Во время очистки барабан медленно вращается, обеспечивая поворот отливок разными сторонами по направлению к движению дроби, вылетающей из металлической головки (турбины) барабана. Для обеспечения требуемой скорости полета дроби турбина установки вращается с частотой около 3000 об/мин.

Дробь, потерявшая скорость в результате соударения с поверхностью отливки или стенки барабана, проходит через отверстия в стенке барабана, ссыпается по склuzu в приёмный лоток и и вновь механически подается на металлическую головку.

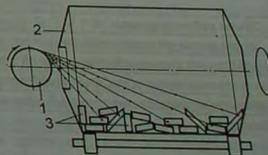


Рис. 12.11. Схема дробеметного барабана: 1 – головка металлическая; 2 – барабан; 3 – отливка

В настоящее время существует большое разнообразие очистного дробебетного оборудования, производимого как на отечественных, так и на зарубежных предприятиях. В частности, для очистки отливок в условиях серийного и массового производства литья, различного по габаритам и типам, фирма SAPI выпускает дробебетные установки с вращающимся барабаном, технические параметры которых приведены в табл. 12.13.

Таблица 12.13

Технические параметры дробебетных установок	Количество дробебетов (турбин), шт	Масса загрузки, кг	Габаритные размеры установок, мм		
			длина	ширина	высота
Модель установки			1,15	3,6	3,2
MG50/63	1	200	1,4	4,2	3,6
MG70/75	1	500	1,45	5	4,2

Все перечисленные выше установки работают с использованием в качестве струйных материалов стальной, чугунной, алюминиевой дробы, корунда и т.п.

Для очистки отливок в дробебетной или дробебетной установке следует использовать металлический песок или дробь с размером частиц до 0,3 мм, во избежание существенного повышения шероховатости обрабатываемых поверхностей отливок. Для очистки элементов ЛПС от остатков КО, пригара и окислов можно использовать дробь больших размеров.

Для очистки мелких отливок от остатков КО, пригара и удаления окалины после термообработки отливок Вылковский завод литейного оборудования (Беларусь) выпускает вибрационные очистные машины (частота вибрации отливок 750...1800 мин<sup>-1</sup>, амплитуда – 1...5 мм). Технические параметры вибрационных очистных машин приведены в табл. 12.14.

Таблица 12.14

Параметры	Значения		
	ВМПВ-200М	ВМ-100М	Мод. 43104
Объем рабочей камеры, л	200	100	125
Общая масса загрузки рабочей камеры, кг	300	220	300
Наибольший размер обрабатываемой детали, мм	120	150	150
Наибольший размер обрабатываемой детали, кг	0,6	1,0	1,5
Наибольшая масса обрабатываемой детали, кг	3000×2300×2500	2200×1830×2540	1850×1050×1470
Габаритные размеры, мм: длина×ширина×высота	2930	3070	1000
Масса, кг			

Основными недостатками абразивоструйной и пескомётной очистки отливок керамическими абразивами (кварцевым песком, электрокорундом, карбидом кремния и т.п.) является значительное пылеобразование и повышение шероховатости поверхности отливок. Вышеуказанными недостатками не обладают гидropескоструйные установки, используемые, помимо пескоструйных установок, для очистки отливок из сплавов на основе меди и алюминия. Для очистки отливок из этих сплавов в гидropескоструйной камере (установке), например, мод. Т0266 (Изготовитель – "Амурлитмаш", г. Комсомольск-на-Амуре, Россия), используют смесь, состоящую (по массе), из 20% кварцевого песка и 80% воды. Если гидropескоструйную обра-

ботку используют для очистки стальных или чугунных отливок, то применяемая смесь должна состоять из 30% кварцевого песка и 70% воды.

Следует отметить, что отливки с монокристаллической структурой из безупреднолитых жаропрочных никелевых сплавов не следует подвергать пескоструйной, дробебетной или какой-либо другой подобной обработке. Это обусловлено возможностью протекания процессов рекристаллизации при дальнейшей термообработке отливок. В связи с этим очистку данных отливок проводят только в средах, растворяющих или растворяющих остатки керамического стержня и КО на поверхности отливок.

За рубежом достаточно широко распространены химико-механические способы очистки (процесс "Шар-барабан", процесс "Рото-финиш", шлифовальный процесс по методу Труувалля [43]). Процесс "Шар-барабан" предполагает проведение очистки отливок в жидкости, во вращающемся барабане, куда совместно с отливками загружают полировочные шары. Процесс "Рото-финиш" предполагает обработку лировочными материалами (чипсами). В шлифовальном процессе с абразивными и полировочными материалами (чипсами). В шлифовальном процессе по методу Труэлектрорундовые абразивы, загружаемые в галтовочный барабан вместе с от-

ливками. Фирма RÖSLER (Германия), производитель дробебетного, дробебетного и галтовочного оборудования, в зависимости от твердости очищаемой поверхности отливок, в качестве абразива (чипсов) рекомендует использовать следующие абразивы:

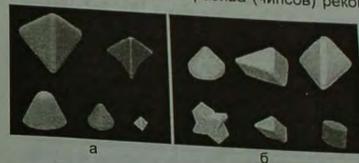


Рис. 12.12. Абразивы (чипсы) фирмы RÖSLER: а – пластмассовые, б – керамические

керамические шарики, пирамидки, "звездочки", ромбы и т.п., пластмассовые абразивы – в форме конусов, пирамид, линз и т.п. (см. рис. 12.12), для полировки поверхности мелких отливок рекомендуется использовать стеклянные шарики, сателлиты и цилиндры, супервилпат (безпыльный продукт переработки кукурузы и целлюлозы), гранулят из скорлупы грецких орехов.

Очистку поверхности изделий фирма RÖSLER рекомендует осуществлять в сочетании с жидкими или порошковыми компаундами. Использование компаундов, разработанных фирмой RÖSLER, позволяет защитить очищаемую поверхность от коррозии, а также обезжирить её, осветлить и протравить.

**Удаление из отливок керамических стержней.** В условиях серийного и мелкосерийного производства отливок, содержащих керамические стержни, удаление стержней из отливок проводят как в установках собственного производства, так и на специализированных линиях, к числу которых относится линия мод. 67051 (Изготовитель – ГУП "Тираспольский завод литейных машин им. С.М. Кирова", Молдова), предназначенная для удаления керамических стержней из отливок (турбинных лопаток) в расплаве фтористых солей (бифторидов калия и аммония).

На линии (см. рис. 12.13) выполняются следующие технологические операции: установка (в касету) и стем лопаток, нагрев лопаток до температуры 350...370°C, смешивание и расплавление фтористых солей калия и аммония; удаление стержней из лопаток в расплаве фтористых солей при температуре 350...370°C, предварительная промывка лопаток в теплой воде (при 60°C последовательно, в двух ваннах), промывка лопаток в горячей проточной воде (при 90°C с барботажем воз-

духом), промывка внутренних полостей горячей проточной водой (при 90°C под давлением), снятие фторидной пленки с поверхностей лопаток, промывка лопаток в проточной воде после снятия фторидной пленки, окончательная промывка в дис-тиллированной воде, межоперационная транспортировка кассет с лопатками грузо-вым манипулятором.



Рис. 12.13. Общий вид линии мод. 67051

Технические параметры линии мод. 67051 приведены в табл. 12.15.

На некоторых отечественных предприятиях удаление керамических стержней проводят методом выщелачивания в насыщенных водных растворах щелочей в условиях повышенных температур и давлений.

В частности, для высокотемпературного выщелачивания под давлением (см. рис. 12.14) отливки 2 помещают в стальную капсулу 1 объёмом 0,003...0,005 м<sup>3</sup> и толщиной стенок 15...20 мм. Отливки в капсуле размещают как можно плотнее. Пространство между отливками в капсуле заполняют водным раствором щёлочи плотностью 1,45 г/см<sup>3</sup> с таким расчётом, чтобы залитый раствор был под уровень загрузочного окна капсулы. Герметизацию окна капсулы проводят с использованием плоской стальной крышки 3, закрепляемой на фланце загрузочного окна капсулы посредством болтов. Для уплотнения соединения крышки и капсулы используют медную прокладку 5. По окончании сборки капсулу помещают в электрическую печь и нагревают до соответствующей температуры, удерживая и вращая капсулу за хвостовик 4 с частотой ~5 об/мин. В капсуле удаление стержней, изготовленных на основе SiO<sub>2</sub>, проводят в водном растворе КОН, нагретом до 220...250°C. Для стержней на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> используют водный раствор NaOH, нагреваемый в капсуле до 300°C. При нагреве капсулы до 250...300°C давление внутри капсулы возрастает до 16...22 МПа. В таких усло-

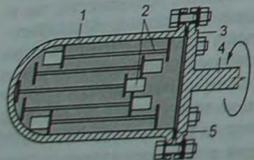
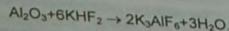


Рис. 12.14. Схема капсулы для удаления керамических стержней из отливок

Технические параметры линии мод. 67051

Параметры	Значения
Производительность, лопаток/ч	30
Габаритные размеры обрабатываемых лопаток, мм:	
Масса лопатки, кг	80×50×150
Расход воды, м <sup>3</sup> /ч	1
Установленная мощность, кВт	10
Габаритные размеры, мм:	75,5
длина×ширина×высота	16000×2100×3600
Масса, кг	9000

виях длительность выщелачивания, как правило, составляет 16...20 ч. Для удаления стержней также используют гидродинамический способ с предварительным химическим разупрочнением материала стержня в расплаве фторидных солей (в расплаве бифторида-полифторида калия). В этих случаях разупрочнение стержней проходит при t=360°C по реакции.



(12.5)

Впоследствии разупрочнённый стержень из отливки удаляют в гидродинамической установке, например, мод. ГДУ-200, под направленной струей водопроводной воды, истекающей под давлением в 15...20 МПа через сопло диаметром 1,0...1,8 мм. Длительность удаления разупрочнённого керамического стержня в гидродинамической установке зависит от его конфигурации и протяжённости и составляет от 20...30 с до 20...30 мин.

**Очистка отливок из алюминиевых сплавов.** Помимо очистки механическими способами, очистку отливок из алюминиевых сплавов от остатков КО, изготовленной на основе ГРЭС и SiO<sub>2</sub>, также проводят и электрогидравлическим способом [198], и химическими способами. При этом удаление остатков КО с поверхности отливок, изготовленных из алюминиевых сплавов, не проводят в водных растворах щелочей. Это ограничение связано с тем, что в водной щелочной среде алюминий активно взаимодействует со щёлочью (KOH, NaOH).

Согласно способу химической очистки отливок из алюминиевых сплавов, предложенному К.С. Ковалдовым и К.А. Борисовым, для очистки отливки из алюминиевых сплавов попеременно погружают в холодный и горячий 30...50%-ный водный раствор бифторида калия.

Согласно способу, предложенному В.К. Доценко и В.А. Марченко с сотрудниками [188], для очистки от остатков КО алюминиевые отливки на 20 мин погружают в расплав NaOH, содержащий 0,5% Zn и нагретый до 500°C. После извлечения из расплава отливки охлаждают на воздухе и промывают 15...20 с в 3%-ном растворе азотной кислоты и на 20 мин – в кипящий 5%-ный раствор бихромата калия. После извлечения из раствора бихромата калия отливки промывают в холодной воде и просушивают при 150°C.

**Защитка отливок.** Защитка отливок, как технологическая операция, предполагает удаление с их поверхности остатков литников, "гребешков" и других поверхностных неровностей. Удаление с поверхности отливок остатков литников (приливы от питателей, прибылей и выпоров) в условиях мелкосерийного и серийного производства отливок производят вручную на стационарных абразивных или наждачных станках. Отливки из стали, бронзы и алюминиевых сплавов зачищают корундовыми шлифовальными кругами, отливки из серого чугуна – карборундовыми кругами. Отливки из "мягких" сплавов (медных, алюминиевых, магниевых) в условиях единичного (индивидуального) производства также могут обрабатывать напильниками и надфилями.

В условиях массового производства мелких стальных отливок общемашиностроительного назначения удаление остатков питателей производят на наждачных станках, оснащённых приспособлениями с автоматическим закреплением отливок, или обрубных прессах, к числу которых, например, относится пресс мод. К2130.

У средне- и крупногабаритных отливок ответственного назначения удаление остатков литников осуществляют с помощью шарошек (пневматическим инструментом) или на металлорежущих станках, а зачистку их поверхности, при необходимости, осуществляют полировальными бабками, шлифовальными кругами и т.п.

## Глава 13. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОТЛИВОК

Термической обработкой (термообработкой) отливок называют процесс их тепловой обработки, проведенный по определенному режиму, для направленного изменения их структуры, с целью достижения определенного уровня механических, физико-химических, технологических, эксплуатационных свойств отливок (литых деталей).

Благодаря возможности достижения вышеуказанных целей, а также относительной простоте и дешевизне используемого оборудования и технологий, термической обработкой на сегодняшний день является самым распространенным способом изменения свойств литых деталей.

Термическая обработка позволяет существенно повысить прочность и твердость металлов и сплавов, долговечность и надежность литых деталей, значительно улучшить механическую обрабатываемость сплавов резанием и т.п.

В качестве примера, приведены обобщенные значения величины предела прочности некоторых сплавов до и после их термической обработки [177].

Предел прочности сплавов

Сплав	σв, МПа	
	до термообработки	после термообработки
Сталь углеродистая	350–600	700–1200
Сталь конструкционная легированная	500–700	1000–2200
Чугун высокопрочный	300–400	600–1000
Сплав алюминиевый	150–240	300–600
Сплав титановый	600–800	1200–1400

Таблица 13.1

В основу классификации видов термической обработки металлов и сплавов положены типы структурных изменений, происходящие в них при тепловом воздействии на них. Исходя из этого, термическую обработку металлов и сплавов подразделяют на:

- термическую (состоит только в тепловом воздействии на металл или сплав);
- химико-термическую (сочетает тепловое и химическое воздействие на металл или сплав);
- термомеханическую (сочетает тепловое воздействие и пластическую деформацию металла или сплава).

При этом термическая обработка, как таковая, включает следующие виды: отжиг, закалку, старение и отпуск.

Отжиг – это разновидность термической обработки отливок, направленная на получение равновесных (устойчивых) структур в сплаве. В результате проведения отжига снижается твердость и повышается вязкость сплавов, улучшается обрабатываемость отливок, в литых деталях снимаются внутренние (остаточные) напряжения, устраняется структурная неоднородность сплава, в связи с чем происходят определенные изменения его физических свойств.

В термической обработке различают следующие виды отжига: отжиг первого рода и отжиг второго рода

**Отжиг 1-го рода** (гомогенизационный, рекристаллизационный, а также проводимый с целью уменьшения остаточных напряжений в отливке) частично или полностью устраняет отклонения структуры от равновесного состояния, возникшие в результате кристаллизации сплава.

Процессы, приводящие сплав в равновесное состояние при нормальных условиях, проходят самопроизвольно. В этом случае нагрев при отжиге 1-го рода отжига первого рода является завершением этих процессов. Основными параметрами при данной температуре.

В зависимости от природы удаляемого отклонения структуры от ее равновесного состояния, различают следующие разновидности отжига 1-го рода.

**Отжиг омогенизационный (диффузионный).** Данный вид отжига направлен на устранение последствий дендритной ликвиации сплава в микрорегионах, соизмеримых с размером его зерен, приведшей к неоднородности сплава в отливке, а также в ряде случаев являющейся причиной появления неравновесных фаз в структуре сплава, например, химического соединения, охрупчивающего сплав. То есть гомогенизационный отжиг интенсифицирует диффузионные процессы, приводящие к сплав становится более однородным (однофазным), у сплава повышается пластичность и антикоррозионные свойства, повышается стабильность его механических свойств и уменьшается их анизотропия по телу отливки.

Как правило, температура гомогенизационного отжига составляет 0,8...0,9 температуры плавления (температуры солидуса) сплава.

**Отжиг рекристаллизационный.** Рекристаллизационный отжиг в структуре сплава устраняет неравновесные составляющие, возникшие в результате пластической деформации сплава. По понятным причинам, для термообработки литых деталей данный вид отжига не используют.

**Отжиг, уменьшающий напряжения,** применяют к отливкам, у которых в результате их затвердевания, сварки, термообработки и других технологических процессов или операций возникли недопустимо большие остаточные напряжения, взаимно уравновешивающиеся внутри тела отливки, без участия внешних нагрузок. Значительные остаточные напряжения в отливках могут вызвать искажение их формы и размеров как во время их обработки, эксплуатации, так и при хранении.

Сущность данного типа отжига отливок состоит в том, что при нагреве отливки предел текучести сплава снижается и, когда его величина становится меньше величин остаточных напряжений в отливке, происходит их быстрая разрядка, обусловленная пластическим течением сплава в разных слоях тела отливки.

**Отжиг 2-го рода** применим только к тем металлам и сплавам, у которых с изменением температуры протекают фазовые превращения. При нагреве, в процессе проведения отжига второго рода, в сплаве происходят качественные или количественные изменения его фазового состава и, соответственно, обратные изменения – при охлаждении сплава.

Основные параметры процесса отжига второго рода – температура нагрева отливки, время выдержки отливки при данной температуре и скорость охлаждения отливки после отжига. Температуру и время отжига выбирают из расчета обеспечения прохождения в сплаве необходимых фазовых изменений, например, полиморфного превращения или растворения избыточной фазы. Скорость охлаждения отожженной отливки должна быть такой, чтобы в процессе понижения температуры отливки в сплаве успели пройти обратные фазовые превращения, обусловленные процессами диффузии.

С этой целью, при проведении отжига второго рода, отливки охлаждают вместе с печью или на воздухе. Процесс охлаждения отливок на воздухе называют нормализацией. Как правило, отжиг второго рода применяют к стальным отливкам с целью измельчения их структуры, понижения твердости и улучшения обрабатываемости резанием.

**Закалка** — вид термической обработки отливки, состоящий в их нагреве и последующем быстром охлаждении с целью фиксации структуры высокотемпературного состояния сплава или предотвращения (подавления) нежелательных процессов, происходящих при его медленном охлаждении. По сути, закалка является для дья низких температур (комнатной температуры), позволяющим фиксировать структуру, нехарактерную для низких температур отливки только в случае, когда реально достижимая скорость охлаждения отливки достаточна для предотвращения развития процессов, подавление или недопущение которых является целью закалки.

**Закалка без полиморфного превращения** — подготовка сплава к старению. Данный вид закалки применим к любым сплавам, у которых при нагреве в основной фазе сплава полностью или частично растворяется избыточная фаза.

Качество проведения закалки без полиморфного превращения определяется температурой и длительностью нагрева отливки, скоростью охлаждения отливки после её изотермической выдержки. При назначении скорости охлаждения отливки исходят из того, что назначенная скорость понижения температуры отливки должна предупредить выделение избыточной фазы в структуре сплава.

В зависимости от фазового состава и особенностей структуры в исходном состоянии, закалка без полиморфного превращения может как упрочнять, так и разупрочнять термообрабатываемый сплав.

**Закалка с полиморфным превращением** применима к любым металлам и сплавам, у которых при охлаждении происходит полиморфное превращение.

К числу основных параметров процесса относятся: температура и длительность нагрева отливки, а также скорость её охлаждения. Для закалки нагрев отливки до температуры, превышающей критическую, с целью появления в структуре сплава высокотемпературной фазы. Охлаждают нагретую отливку с такой скоростью, при которой перестройка кристаллической решётки сплава протекала бы по механизму бездиффузионного мартенситного превращения. То есть в процессе закалки с полиморфным превращением образуется мартенсит, в связи с чем, такую термообработку отливок называют закалкой отливок на мартенсит. Основная цель закалки отливок на мартенсит — повышение твёрдости и прочности сплава, а также подготовка отливки к отпуску.

В зависимости от степени легирования сплавов, выбирают соответствующую закалочную среду — среду, обеспечивающую необходимую скорость охлаждения каждой конкретной отливки после её изотермической выдержки. Например, углеродистые стали закалывают на мартенсит в воде, а многие легированные стали, характеризующиеся низкой скоростью протекающих в них диффузионных процессов, закалывают на мартенсит в масле или на воздухе.

**Старение.** Старению подвергают сплавы, которые были закалены без полиморфного превращения, где пересыщенный твёрдый раствор термодинамически неустойчив и склонен к самопроизвольному распаду. Старение, как способ термической обработки отливок, направлен на образование, путём диффузии внутри зерен твердого раствора, участков, обогащенных растворённым элементом (зон Гинье — Престона) и (или) дисперсных частиц избыточных фаз (как правило, химических соединений). Возникшие при старении зоны и дисперсные частицы выделяющихся фаз тормозят скопление дислокаций в кристаллах, чем и обусловлено у-

прочнение сплава при старении. Именно поэтому стареющие сплавы называют дисперсионно-твёрдеющими.

Поскольку основной движущей силой процесса старения сплавов является диффузия, то основными параметрами этого процесса являются температура и длительность (время) выдержки отливки при температуре старения.

С повышением температуры возрастает интенсивность старения и, соответственно, сплав быстрее упрочняется. Тем не менее, начиная с определённой длительности перестаривания, при определённой, достаточно высокой температуре, происходит перестаривание сплава — понижение его прочности. Понижение прочности дога раствора, приводящей к их укрупнению. Слияние крупных и мелких дисперсных выделений уменьшает их число в сплаве, в результате чего торможение дислокаций дисперсными выделениями в зёрнах твёрдого раствора сплава уменьшается, как, собственно, и его прочность.

В основном, сплавы подвергают старению с целью повышения их прочности и твёрдости, а также для повышения коэрцитивной силы у магнитотвёрдых сплавов.

**Отпуск.** Отпуску подвергают, в основном, стали, закалённые на мартенсит. Основными параметрами отпуска являются: температура нагрева и время изотермической выдержки отливок и, в некоторых случаях, скорость охлаждения (скорость охлаждения отливок назначают с целью предупреждения возникновения у них отпусковой хрупкости). В результате проведения отпуска у сплавов понижается прочность и твёрдость с одновременным ростом пластичности и ударной вязкости.

Сущность структурных изменений в сплаве при отпуске та же, что и при старении — распад термодинамически неустойчивого пересыщенного раствора под воздействием температуры. Отличие процесса отпуска сплава от процесса старения стали — с поведением углерода в мартенсите. То есть, термин "отпуск" применяют к термической обработке, направленной на распад мартенситной структуры в инструментальных и конструкционных сталях. Термин "старение" применяют к термической обработке, направленной на распад пересыщенного твёрдого раствора в цветных сплавах (никелевых, алюминиевых и пр.).

**Термическая обработка стальных отливок.** Основными видами термообработки сталей являются: отжиг, нормализация, закалка, отпуск и химико-термическая обработка.

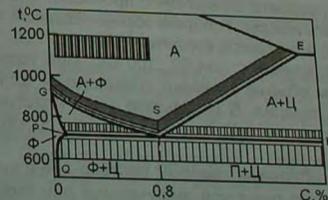


Рис. 13.1. Температура отжига углеродистых сталей:

- ГОМОГЕНИЗАЦИЯ;
- НОРМАЛИЗАЦИЯ;
- ОТЖИГ ПОЛНЫЙ;
- ОТЖИГ НЕПОЛНЫЙ;
- ОТЖИГ НИЗКИЙ

Разновидность термообработки сталей неразрывно связана с диаграммой фазового состояния Fe-C, представленной на рис. 13.1. Рассматривая "стальной" участок данной диаграммы (содержание углерода менее 2,14%) следует напомнить, что нижняя точка  $A_1$  лежит на линии PSK и соответствует температуре превращения аустенит ↔ перлит. Точка  $A_3$  располагается на линии GSE и соответствует началу выделения (при охлаждении) и окончанию растворения (при нагреве) феррита в доэвтектидной стали или вторичного цементита в заэвтектидной стали.

Для того чтобы указанные точки различать в процессе описания про-

цесса термообработки при нагреве и охлаждении стали, рядом с буквой А ставят индекс "с" – если сталь нагревают и, соответственно, индекс "р" – если сталь охлаждаются. То есть, исходя из принятых условных обозначений, температуру прессования перлита в аустенит принято обозначать  $A_{C_1}$ , аустенита в перлите –  $A_{C_2}$ . Соответственно, температуру окончания растворения феррита в аустените обозначают  $A_{C_3}$ , а температуру начала выделения феррита из аустенита –  $A_{C_4}$ . Для заэвтектоидных сталей температуру окончания процесса растворения вторичного цемента в аустените обозначают  $A_{C_5}$  или  $A_{C_{cm}}$ , а температуру, при которой в структуре стали начинается выделение вторичного цементита, обозначают  $A_{C_6}$  или  $A_{C_{cp}}$ .

Возможность влияния термической обработки на структуру и свойства сталей определяется ходом процесса вторичной кристаллизации, которая, в соответствии с диаграммой состояния Fe-C, проходит по линиям GS, SE и PK.

Вторичная кристаллизация, при низкой скорости понижения температуры отливков (медленном охлаждении), проходит в полном соответствии с диаграммой состояния Fe-C и характеризуется следующими этапами:

- 1) превращением аустенита в феррит;
- 2) выделением из аустенита мельчайших частиц цементита;
- 3) укрупнением частиц цементита, размеры которых меняются от долей микронов до нескольких микрон.

Реализация всех трех вышеуказанных этапов вторичной кристаллизации приводит, в соответствии с диаграммой состояния Fe-C, к образованию перлита в структуре стали.

Для протекания вторичной кристаллизации существенное значение имеют условия охлаждения отливок. Незначительная степень переохлаждения или весьма медленное охлаждение отливок обеспечивают получение в сталях равновесных структур. Чем больше степень переохлаждения аустенита или скорость его охлаждения, тем более неравновесна структура получаемой стали.

Изменяя условия охлаждения отливок, получают самые разнообразные модификации перлита: сорбит, троостит или мартенсит, существование которых оказывает значительное влияние на свойства сталей.

Сорбит в структуре стали возникает при скорости её охлаждения порядка  $50^\circ\text{C}/\text{с}$ . При этом, в процессе образования сорбита ограниченно протекают все вышеперечисленные этапы вторичной кристаллизации. Толщина образовавшихся при этом пластинок цементита –  $0,1 \dots 0,5 \cdot 10^{-8}$  м, а твердость сорбита –  $250 \dots 350$  HB.

Троостит образуется при скорости охлаждения стали  $50 \dots 100^\circ\text{C}/\text{с}$ . При указанной скорости охлаждения в стали в полном объеме успевают завершиться только первый и второй этапы вторичной кристаллизации. В результате этого пластинки цементита в троостите не превышают по толщине  $1 \cdot 10^{-10}$  м, а твердость троостита составляет  $350 \dots 450$  HB.

Мартенсит – это пересыщенный метастабильный твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -Fe с искаженной кристаллической решеткой, получаемый при скорости охлаждения стали порядка  $150 \dots 200^\circ\text{C}/\text{с}$ . Минимальную скорость охлаждения, при которой весь аустенит переохлаждается и превращается в мартенсит, называют критической скоростью закалки. При нагреве мартенсит переходит в более устойчивые структуры: троостит, сорбит и перлит.

Мартенсит в структуре стали получают путем реализации только первого этапа вторичной кристаллизации. Мартенсит характеризуется пластинчатым (на шлифе – игольчатым) строением. По сравнению с другими структурными составляющими стали, мартенсит имеет наибольший удельный объем. Увеличение удельного объ-

ема при образовании мартенсита приводит к возникновению во время закалки больших внутренних напряжений в отливке, вызывающих её деформацию, а в некоторых случаях и образование трещин. С появлением мартенсита в структуре стали возрастает её твердость (HB 180...650) и хрупкость, с одновременным понижением плотности и вязкости.

Мартенситная структура стали после закалки – метастабильна, поэтому для её перехода в более устойчивую форму (структуру) проводят отпуск литых деталей.

Отжиг. Данный вид термообработки направлен на изменение (улучшение) литой структуры стали, снятия внутренних напряжений в отливке, понижение твердости (для улучшения обработки резанием), а также для подготовки структуры стали последующим видам (этапам) термической обработки.

Отжиг предполагает нагрев стальных деталей до температуры, несколько превышающей величину критических точек  $A_{C_1}$  или  $A_{C_2}$ , изотермическую выдержку при данной температуре и последующее охлаждение с очень низкой скоростью (как равновесного состояния).

В случае, если нагрев осуществлен до температуры, превышающей температуру  $A_{C_2}$  на  $30 \dots 50^\circ\text{C}$ , отжиг называют полным. Если температура изотермической выдержки отливки в процессе термообработки была выше температуры  $A_{C_1}$ , но ниже  $A_{C_2}$ , отжиг называют неполным.

При неполном и низкотемпературном (низком) отжиге происходит лишь частичная перекристаллизация стали. При этом структура стали после отжига находится в полном соответствии с диаграммой состояния Fe-C.

Полному отжигу подвергают лишь отливки из доэвтектоидной стали, поскольку полный отжиг заэвтектоидных сталей, после медленного охлаждения отливок, приводит к образованию в структуре стали грубой цементитной сетки, что, в свою очередь, приводит к снижению технологических и механических свойств стали.

Отжиг нормализационный (нормализация). Данный вид термообработки направлен на изменение литой структуры стали, снижение внутренних напряжений в отливке, улучшение обрабатываемости стали резанием, улучшение механических свойств стали, а также для подготовки структуры стали к последующим видам (этапам) термической обработки.

При нормализации стальные отливки нагревают до температуры, превышающей значения критических точек  $A_{C_1}$  ( $A_{C_{cm}}$ ) на  $30 \dots 50^\circ\text{C}$ , с последующей выдержкой при данной температуре и охлаждением отливок на воздухе.

В результате нормализации стали, содержащие углерода менее 0,3%, приобретают ферритно-перлитную структуру, а стали, содержащие 0,3...0,7% углерода – сорбитную.

Нормализацию проводят в случае необходимости получения мелкозернистой однородной структуры стали, с более высокой твердостью и прочностью, но с несколько меньшей пластичностью, чем после отжига. При нормализации в заэвтектоидных сталях исчезает цементитная сетка, поэтому зачастую нормализацией заменяют полный или неполный отжиг при подготовке литых деталей из углеродистых сталей к их последующей механической обработке. По сравнению с отжигом нормализация – более производительный и экономичный процесс.

Отжиг диффузионный (гомогенизация). Диффузионный отжиг стальных отливок применяют для достижения химической и структурной гомогенизации (однородности) литых деталей, улучшения механических свойств стали в отливках.

Диффузионный отжиг проводят отливку из легированной стали до температуры, превышающей температуру  $A_{c1}$  ( $A_{c1}$ ) на 200...300°C, с последующей длительной (8...18 ч) выдержкой при данной температуре и охлаждением с очень низкой скоростью (как правило, вместе с печью, в которой проводили отжиг).

**Закалка.** Закалку отливок, превышающих нагрева до температуры, превышающей температуру  $A_{c1}$  на 20...40°C (для доэвтектоидной стали) или выше температуры  $A_{c1}$  на 30...50°C (для эвтектоидной стали), выдержкой и заэвтектоидной стали), выдержкой при данной температуре и последующим быстрым охлаждением отливок (в воде, масле, расплавах солей и других средах). Для отливок из легированных марок сталей температура их нагрева под закалку может быть выше температуры  $A_{c1}$  на 50...150°C.

Высокая скорость охлаждения отливок от температуры изотермической выдержки обеспечивает переохлаждение аустенита до низких температур и его превращение в структуре закалённой стали – мартенсит.

К основным дефектам, которые могут возникнуть при закалке стальных деталей, относят трещины и коробление (деформация). Избежать образования трещин и коробления в отливках можно путём тщательного соблюдения режимов термообработки. Коробления в отливках также можно избежать путём обеспечения равномерности нагрева детали под закалку и правильным положением детали при её погружении в закалочную среду.

Во избежание возникновения коробления и трещин в отливках из легированных марок сталей, имеющих меньшую теплопроводность, чем стали углеродистые, нагрев и охлаждение отливок следует проводить при меньших скоростях.

**Старение.** В некоторых случаях, после закалки отливок проводят их старение. Старение сплавов, как правило, проводят с целью повышения их прочности и твёрдости. При этом в разных сплавах и при различных температурах старения и времени упрочнения сплавов соответствует разным структурным состояниям.

Для определения ориентировочной температуры, обеспечивающей максимальные прочностные свойства закалённого сплава, температуру старения можно рассчитать по эмпирической формуле [177]:

$$T_{\text{СТАР}} = (0,5 \dots 0,6) \cdot T_{\text{пл}}, \quad (13.1)$$

где  $T_{\text{СТАР}}$  и  $T_{\text{пл}}$  – температура старения сплава и температура плавления сплава соответственно, К.

Образовавшийся в результате закалки сплава твёрдый раствор находится в неустойчивом состоянии и стремится к приобретению устойчивого состояния путём распада на стабильные фазы. При распаде такого раствора, в результате старения, образуются различные типы выделений, которые препятствуют движению дислокаций в структуре сплава и тем самым упрочняют сплав.

**Обработка холодом.** Метод термической обработки холодом был разработан и предложен А.П. Гуляевым. Сущность обработки холодом стальных отливок заклю-

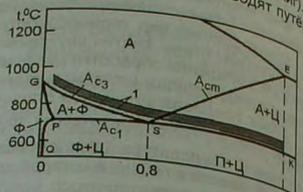


Рис.13.2. Температура нагрева отливок из углеродистой стали под закалку (1 – интервал температур под закалку)

чается в охлаждении закалённых отливок до отрицательной (по шкале Цельсия) температуры. Обработке холодом подвергают лишь те стальные отливки, в структуре которых после закалки присутствует остаточный аустенит (углеродистые и легированные инструментальные стали – для повышения их твёрдости и износостойкости; стали для измерительного инструмента – для повышения их точности; стали постоянных размеров – для стабилизации размеров; а также детали, работающие в узлах стали постоянного состояния – с целью повышения магнитных свойств и т.д.).

В закалённом состоянии в структуре многих сталей может присутствовать остаточный аустенит, что в большинстве случаев нежелательно. Причиной образования мартенсита аустенита в структуре сталей, является то, что процесс начинается образование мартенсита в определённом интервале температур. При этом температура начала образования мартенсита в стали, как правило, при температуре образования мартенсита ( $M_s$ ) для ряда сталей значительно ниже комнатной температуры.

В качестве примера на рис. 13.3 представлена зависимость температуры начала ( $M_s$ ) и окончания ( $M_f$ ) выделения мартенсита в структуре стали от содержания углерода. Из хода зависимостей, представленных рис. 13.3, следует, что с увеличением содержания углерода температура начала и окончания выделения мартенсита в структуре стали понижается. Причём при содержании углерода более ~0,55% температура окончания мартенситного превращения в структуре стали становится ниже 0°C.

Наличие примесей и значительного количества легирующих элементов в составе большинства марок сталей приводит к тому, что точка  $M_s$  оказывается ниже 0°C и при значительно меньших содержаниях углерода в стали. Поэтому после закалки в структуре сталей, имеющих  $M_s < 20^\circ\text{C}$ , всегда присутствует определённое количество остаточного аустенита. В связи с этим отливки из таких сталей, с целью уменьшения в их структуре количества остаточного аустенита, сразу после закалки обрабатывают холодом – понижают их температуру до температуры окончания мартенситного превращения аустенита в стали ( $M_f$ ).

В результате обработки холодом повышается твёрдость и износостойкость стали, стабилизируются размеры литой детали, повышаются ферромагнитные характеристики стали. Существенным недостатком процесса обработки деталей холодом является высокая вероятность образования в них закалочных трещин.

В зависимости от величины требуемой температуры, обработку отливок холодом осуществляют либо путём их погружения в охлаждающую смесь, либо путём их погружения в сжиженный газ, либо охлаждение отливок проводят в камере холодильной компрессорной машины.

Говоря об охлаждающих смесях или сжиженном газе следует отметить, что в этом случае обработку отливок холодом можно проводить не только путём погружения отливок в охлаждающую смесь или сжиженный газ, но и в ёмкости, стенки которой охлаждаются указанными веществами.

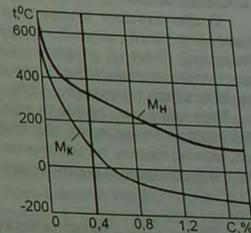


Рис.13.3. Влияние содержания углерода в углеродистой стали на температуру начала ( $M_s$ ) и окончания ( $M_f$ ) мартенситного превращения



Аллитирование – вид диффузионной металлзации, процесс насыщения поверхности литой детали алюминием с целью повышения её жаростойкости и коррозионной стойкости.

Хромирование – вид диффузионной металлзации, процесс насыщения поверхности литой детали хромом с целью повышения её износо-, жаро-, эррозно- и коррозионной стойкости.

Силицирование – вид диффузионной металлзации, процесс насыщения поверхности литой детали кремнием с целью повышения её кислотостойкости.

Титанирование – вид диффузионной металлзации, процесс насыщения поверхности литой детали из низкоуглеродистой стали титаном с целью повышения её коррозионной и кавитационной стойкости. У литых деталей из средне- и высокоуглеродистых сталей насыщение поверхности титаном, помимо этого, приводит к повышению их твердости и износостойкости.

**Химическая обработка (пассивация) отливок.** Химической обработке (пассивации) в некоторых случаях подвергают отливки из углеродистой и низколегированной стали, а также латуни. Пассивация – образование на поверхности отливки устойчивой оксидной плёнки под действием концентрированных кислот или растворов солей. Например, концентрированная серная кислота пассивирует Co, Fe, Mg, Nb, Bi, Be, а концентрированная азотная кислота пассивирует Al, Cu, Fe, Cr, Ni, Nb, Ni, Pb, Th, Be, Bi, U. После пассивации металл не реагирует с кислотой.

Пассивацию отливок из углеродистых и низколегированных сталей проводят непосредственно в литейном цехе, с использованием водного раствора нитрата натрия и глицерина. Основная цель пассивации – защита отливок от коррозии при их длительном (до трёх месяцев) хранении.

Для пассивации отливок готовят водный раствор, состав которого приведен в табл. 13.3.

**Состав раствора для пассивации стальных отливок из углеродистой и низколегированной стали**

Таблица 13.3

Вещество	Порядковый номер вещества при его вводе в раствор (в воду)	Химическая формула	Концентрация, г/л	Количество на 1 м <sup>3</sup> , кг
Нитрат натрия	1	NaNO <sub>3</sub>	100-200	150
Сода кальцинированная	2	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	5	5
Глицерин	3	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	50	50
Вода		H <sub>2</sub> O	остальное	остальное

Для приготовления раствора в ванну заливают 250...300 л воды и вводят небольшими партиями вещества в том порядке и количестве, в котором они указаны в табл. 13.3. После ввода веществ раствор тщательно перемешивают и его количество путём доливания воды увеличивают до 1 м<sup>3</sup>. Контроль раствора проводят один раз в неделю на содержание в растворе NaNO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>.

Пассивацию отливок проводят следующим образом. В ванну с приготовленным раствором на 1...2 мин погружают отливки, после чего отливки извлекают из ванны и дают стечь излишкам раствора с их поверхности. Контроль качества пассивации оценивают визуально по цвету поверхности отливок. При правильно выполненной пассивации отливки должны иметь на поверхности плёнку, окрашенную в тёмно-серый цвет.

**Термическая обработка чугунных отливок.** Цель термической обработки чугунных отливок – снятие внутренних напряжений, стабилизация размеров отливки и усталей, в зависимости от вида термической обработки, улучшение обрабатываемости чугуна. Повышает его твердость, износостойкости. Например, чугун приобретает гунах – увеличивает количество связанного углерода. Закалку серого чугуна дают из аустенитно-графитного состояния при температуре 840...900°C с последующим охлаждением в воде (отливки простой конфигурации) или масле (отливки сложной конфигурации). Во избежание появления на отливках закалочных трещин, охлаждения отливок в охлаждающей среде делают отливку закалочных трещин, чешуи свойств закалённых чугунных отливок регулируют путём проведения их отжигания с целью предотвращения коробления и достижения требуемого уровня м. Отпуск серого чугуна осуществляют для регулирования его твердости.

Для повышения прочности не менее важна термическая обработка и для отливки, изготовленных из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. В качестве примера в табл. 13.4 приведены значения механических свойств ВЧ в зависимости от вида проведенной термической обработки [271].

**Механические свойства термообработанного ВЧ**

Таблица 13.4

Состояние	σв, МПа	δ, %	НВ	σ-1, МПа	σ <sub>-1</sub> НДП*, МПа
Исходное (до термообработки)	700	3	255	290	190
После нормализации (900°C)	900	3	325	340	210
После двойной нормализации (900°C)	1050	4	360	-	-
После закалки (900°C)	180	0,8	550	-	-
После закалки (900°C) и отпуска (675°C)	800	6	190	-	-
После закалки (900°C) и отпуска (600°C)	940	4	295	340	210
После закалки (900°C) и отпуска (550°C)	1000	1,5	350	340	200
После изотермической закалки (880°C) в жидкости с t=350°C	1200	6	360	400	250

Примечание. Приведенные в таблице данные получены для магниевого чугуна.

Режимы термической обработки чугунных отливок и их назначение приведены в табл. 13.5 [271].

**Режимы термической обработки чугунных отливок и их назначение**

Таблица 13.5

Вид обработки	Основные технологические параметры процесса				Назначение обработки
	Скорость нагрева, °С/ч	Температура нагрева, °С	Длительность выдержки при температуре нагрева, ч	Охлаждение	
1	2	3	4	5	6
Отжиг низкотемпературный (искусственное старение)	70-100	500-600, легированных чугунов до 630	В зависимости от конфигурации детали и её габаритных размеров (2-8)	Медленное, с печью 20-50°C/ч, до 250°C	Снятие внутренних напряжений, повышение вязкости, стабилизация размеров детали, снижение деформации



ний ( $\gamma$ -фаза) типа  $Ni_3(Al, Ti)$  и, частично, за счёт карбидов. При этом жаропрочность сплавов растёт с увеличением содержания в их структуре  $\gamma$ -фазы. У наиболее жаропрочных сплавов доля  $\gamma$ -фазы в структуре составляет 60...65%.

Термическая обработка жаропрочных никелевых сплавов стабилизирует их структуру, увеличивает объёмное содержание  $\gamma$ -фазы в структуре, уменьшает её неоднородности по химическому составу и по размерам структурных составляющих, снижает уровень ликвации, что в итоге приводит к существенному повышению характеристик долговечности литых деталей и, в частности, лопаток турбин.

Долевое содержание упрочняющей фазы в жаропрочном сплаве предопределяет температуру нагрева литой детали под закалку. Чем больше содержание  $\gamma$ -фазы в структуре сплава, тем выше должна быть температура нагрева детали под закалку. Охлаждение детали после закалки проводят на воздухе. При этом у сплавов, содержащих большое количество упрочняющей фазы в структуре, значительная её доля успеет выделиться в процессе охлаждения.

Назначаемая температура старения жаропрочных сплавов также зависит от степени легирования сплава и условий работы литой детали. В зависимости от химического состава сплава, старение структуры сплава (для наиболее полного растворения упрочняющей фазы, придания упрочняющей фазе благоприятной формы и соответствующего характера распределения упрочняющей фазы в структуре сплава, в некоторых случаях, для полного ступенчатого старения, используют технологию ступенчатого старения.

При термообработке литых деталей из жаропрочных никелевых сплавов в ряде случаев используют гомогенизацию. При гомогенизации происходит уменьшение степени ликвации и стабилизация структуры сплавов, повышается объёмное содержание дисперсных частиц упрочняющей  $\gamma$ -фазы. Помимо этого, во время высокотемпературной выдержки литой детали в сплаве растворяются грубые выделения  $\gamma$ -фазы, образовавшиеся при кристаллизации.

Следует отметить, что оптимизация режимов термической обработки с целью достижения оптимальной формы, размеров и распределения частиц упрочняющей  $\gamma$ -фазы в структуре металла не всегда сопровождается улучшением его механических свойств. Так, например, образование частиц карбидов  $Me_6C$  пластинчатой формы в процессе гомогенизации и последующего охлаждения сплава ЖС-6У практически не изменяет свойств сплава. В итоге после гомогенизации при температуре 1210°C длительная прочность сплава ЖС-6У остаётся на прежнем уровне.

Неоднородная структура сплавов в литых деталях также образуется и в случае недогрева литой детали до температуры полного растворения упрочняющей  $\gamma$ -фазы в сплаве. Образующиеся в структуре сплава коагулированные частицы  $\gamma$ -фазы снижают величины показателей его прочности и пластичности.

Гомогенизирующая термообработка направленно-закристаллизованных литых деталей из жаропрочных никелевых сплавов сопровождается улучшением их механических свойств, поскольку упрочняющая фаза, в результате направленной кристаллизации сплава отливки, имеет направленную форму и существенно укрупнена. Например, при скорости кристаллизации 4...5 мм/мин размеры  $\gamma$ -фазы в структуре сплава достигают 1 мкм, тогда как после термической обработки размеры  $\gamma$ -фазы уменьшаются в 1,7...2,2 раза, причем выделения  $\gamma$ -фазы в структуре сплава становятся однородными и распределяются равномерно по всему объёму сплава. Следует отметить, что в процессе высокоскоростной направленной кристаллизации частицы  $\gamma$ -фазы вырастают до значительно меньших размеров, чем у на-

правленно-закристаллизованных сплавов при низких скоростях кристаллизации и впоследствии термически обработанных.

В отношении отливок с равноосной макроструктурой следует отметить, что в условиях объёмной кристаллизации сплава скорость охлаждения отливки практически такая же, как и при их термической обработке в вакууме. В связи с этим размер частиц  $\gamma$ -фазы, вышедших во время кристаллизации в вакууме, мало отличается от размеров частиц  $\gamma$ -фазы, выделяющихся в процессе кристаллизации сплава, мало отличающейся от размеров отливок. То есть выделение частиц  $\gamma$ -фазы, мало отличающейся от размеров отливок, не приводит к измельчению частиц  $\gamma$ -фазы в сплаве.

**Термическая обработка отливок из сплавов на основе титана.** Термическая ( $\alpha+\beta$ ) — структура.

Термическая обработка отливок из титановых сплавов, имеющих последующее старение. При этом механические свойства титановых сплавов зависят как от температуры закалки, так и от температуры старения. Для различных марок титановых сплавов температуры их закалки находятся в пределах от 690 до 980°C, а температура старения их закалки находится в пределах от 620°C.

**Оборудование для термической и химико-термической обработки отливок.** Для проведения термической и химико-термической обработки отливок используют термические печи и производительностью.

В зависимости от типа термообрабатываемого сплава, требований к отливкам и т.п., к печам предъявляют определённые требования. Например, стальные и чугунообрабатываемые в печах с безокислительной атмосферой, необходимо термическими припусками у обрабатываемых отливок и чистотой их литой поверхности. В легированных сталях, непосредственно в литейном цехе в условиях крупносерийного и массового производства мелкого литья используют агрегаты нормализации отливок проходного типа с защитной атмосферой.

Агрегат нормализации мелких стальных отливок представляет собой печь проходного типа непрерывного действия (см. рис. 13.4).

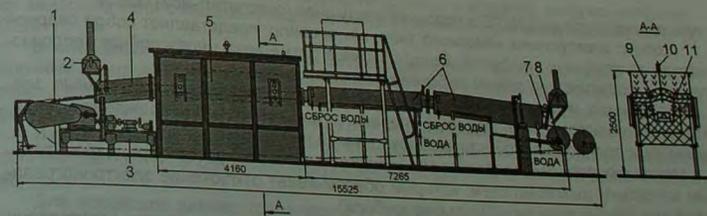


Рис. 13.4. Агрегат нормализации мелких стальных отливок:

- 1 — сетка конвейера; 2 — вытяжной зонт; 3 — станция приводная; 4 — тамбур;
- 5 — рабочая зона печи; 6 — коридор водоохлаждаемый; 7 — тамбур выгрузки отливок;
- 8 — станция натяжная; 9 — шамотная кладка печи; 10 — термопара; 11 — нагреватели

Технические параметры агрегата нормализации мелких отливок из конструкционных нелегированных сталей приведены в табл. 13.6.

Таблица 13.6  
Технические параметры агрегата нормализации отливок

Параметр	Значения
Производительность, кг/ч	250
Скорость движения ленты конвейера, м/мин	0,04-0,16
Рабочая температура, °С	900
Газовая среда печи	Защитная от обезуглероживания и окисления
Расход защитного газа, м³/ч	40-50
Давление газа в печи, мм рт. ст	До 250
Расход воды на охлаждение кожуха, м³/ч	20
Система регулирования температуры	Автоматическая

Наличие безокислительной газовой среды в рабочем пространстве печи позволяет получать отливки с чистой поверхностью. В случае появления на отливках окалины, охлажденные отливки из агрегата нормализации передают на очистку в дробеструйном барабане.

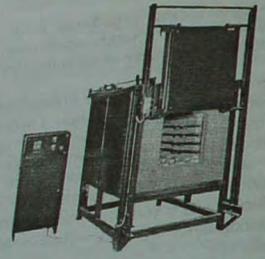


Рис. 13.5. Печь ПКМ

при температуре до 1250°С в условиях воздушной (окислительной) среды.

Корпус электропечи камерного типа, как правило, представляет собой сварной каркас из стальных профилей. Внутри каркаса размещена многослойная теплоизоляция, оформляющая стенки рабочей камеры (пространства) печи.

На стенках и подине рабочей камеры печи размещены нагревательные элементы спирального типа. Подовые спирали от механического повреждения защищены жаропрочной плитой или карборундовыми плитами.

Механизм подъема шибера печи камерного типа оборудован предохранительным концевым выключателем, который обеспечивает отключение электронагревателей при открывании печи (подъеме шибера).

Контроль и регулирование температуры в рабочем пространстве электропечи осуществляется электронным блоком управления с цифровой индикацией температуры или её диаграммной регистрацией по показаниям термопары, установленной в рабочем пространстве печи.

Для термической обработки крупногабаритных отливок используют электропечи камерного типа с выкатным подом.

Термическую обработку более крупных отливок проводят в камерных электропечах с окислительной атмосферой, используя при этом, во избежание обезуглероживания и окисления поверхности отливок, стальные карбюризаторы или чугунной стружки. В случае необходимости отливки засыпают мической обработки в полость коробов подают нейтральный газ (например, аргон).

К термическим печам камерного типа с окислительной атмосферой относятся и печи типа Н, СНО, ПКМ и др. (см. рис. 13.5). В частности, камерные электропечи сопроведения закалки, отжига и отпуска различных металлических изделий (отливок)

В условиях серийного производства отливок, требующих использования защитной атмосферы, также используют специализированные термические печи типа СНЗ.

В частности (см. рис. 13.6), камерная электрическая печь с защитной атмосферой СНЗ 6.12.5/11 (Изготовитель – ЗАО НПК "Накал", Россия) предназначена для сухой каркас, изготовленный из стальной профильной трубы, с герметичным стальным кожухом, который футерован многослойной теплоизоляцией.

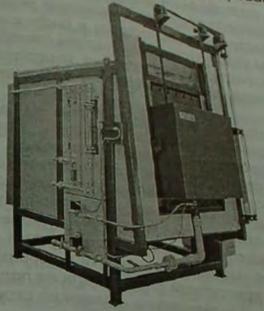


Рис. 13.6. Электрическая печь СНЗ 6.12.5/11

Нагреватели в печи размещены на её боковых стенках и поду рабочей камеры. Загрузочный проем печи закрывается шиберным затвором, футерованным теплоизоляционным материалом. Подъем и опускание шиберного затвора осуществляется пневматическими цилиндрами. Печь оснащена системой газопровода и газовой панелью, куда входит запорно-регулирующая арматура, ротаметры и прибор контроля атмосферы по одному из компонентов печной газовой среды (СО<sub>2</sub>, СО или Н<sub>2</sub>О). В таких печах в качестве защитной атмосферы может использоваться эндогаз, экзогаз или газовая смесь, например, на основе азота с добавкой водорода или метана.

При подъеме шибера печи происходит автоматическое включение пламенной завесы, перекрывающей загрузочный проем. Управление нагревом печи осуществляется автоматически, по показанию процессорного регулятора температуры с цифровой индикацией, и тиристорных силовых модулей.

Для проведения термической обработки отливок в условиях вакуума используют камерные печи с выкатным подом типа СНВ или шахтные вакуумные печи типа СВВ.

В вакуумных электропечах типа СЭВ осуществляют закалку отливок из жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов. Для отжига турбинных лопаток и дисков турбин в вакууме также используют печи ULVAC-60GHS (Япония) с рабочей температурой 1500°С, печь BBC (Германия) с рабочей температурой 1200°С и т.п.

Изотермическую закалку стальных отливок с нагревом под закалку проводят в соляных ваннах типа СВС, с последующим охлаждением отливок в щелочной ванне.

Для процессов химико-термической обработки (цементации, нитроцементации и азотирования) используют электрические шахтные печи типа СНЦА, СБЦА, СНВ, СШЦМ, США. Ионное азотирование деталей проводят на установках "Ион-30", "Салют-60" и др.

**Очистка отливок, прошедших термическую обработку.** После термической обработки отливки могут быть подвергнуты дополнительной, например, абразивоструйной очистке, механической или электрохимической полировке, электрохимической шлифовке и т.п.



ветствии с ГОСТ 7565-81, используя для этого стальной стаканчик-изложница. При выплавке стали в печах открытого типа вместимостью до 500 кг пробы (1...3 шт) для определения химического состава отбирают в середине разливки пробы. При заливке из плавки одной отливки отбор проб проводят по окончании плавки. При заливке из плавки стаканчики-изложницы из чугуна. Для определения химического состава, заливая стаканчики-изложницы металл, взятый от пробного бруска, используемого для механических испытаний, или от отливки.

Если отливку заливают в вакуумной плавильно-заливочной установке, то в качестве пробы обычно служит металл, прилитый к блоку в области одного из питающих элементов ЛПС или отливки. В некоторых случаях образец вырезают из определенного элемента литниковой системы.

Для проведения химического анализа от полученного образца (пробы) берут стружку, а сам образец (пробу) используют для проведения спектрального анализа.

В цехах, не использующих в качестве шихты готовый сплав, контроль химического состава осуществляют для каждой плавки. Если в качестве шихтовой заготовки используют заготовки готового сплава и возврата с известным постоянным химическим составом, то химический состав определяют для каждой десятой или другой плавки.

**Контроль механических свойств.** Все методы проведения механических испытаний стандартизованы. Например, методы испытаний металлов на растяжение проводят по ГОСТ 1497-84, метод определения ударной вязкости при понижении комнатной и повышенной (усталости) — по ГОСТ 25.502-79, метод определения предела выносливости (усталости) — по ГОСТ 25.502-79, метод испытаний на ползучесть — по ГОСТ 3248-81, измерение твердости по Бринеллю — по ГОСТ 9012-59, измерение твердости по Роквеллу — по ГОСТ 9013-59 и т.д.

Испытания металлов и сплавов на растяжение при пониженных температурах согласно ГОСТ 11150-84 проводят при температурах от 0 до  $-100^{\circ}\text{C}$ , а также при  $-196^{\circ}\text{C}$  (температура кипения технического, жидкого азота) и в некоторых случаях при  $-259^{\circ}\text{C}$  (жидкий водород) или  $-269^{\circ}\text{C}$  (жидкий гелий). При этом определяют следующие характеристики: предел текучести (физический и условный), временное сопротивление, истинное сопротивление разрыву, относительное удлинение и сужение.

Кратковременные статические испытания на растяжение при повышенной температуре, согласно ГОСТ 9651-84, проводят при температуре до  $1200^{\circ}\text{C}$ . При этом определяют следующие характеристики: предел текучести (физический и условный), временное и истинное сопротивление разрыву, относительное сужение.

Испытания металлов и сплавов на ползучесть определяют по ГОСТ 3248-81, на длительную прочность — по ГОСТ 10145-81, на кручение — по ГОСТ 3565-80, на сжатие — по ГОСТ 27208-87, на усталость — по ГОСТ 25.502-79.

Основным видом динамических испытаний металлов и сплавов является ударное нагружение надрезанных образцов в условиях изгиба. Форма, размеры и допускаемые отклонения размеров образцов, испытываемых на ударную вязкость, определены в ГОСТ 9454-78. Определение величины ударной вязкости проводят при комнатной температуре, а также при пониженных и при повышенных температурах.

Методы испытаний специальных свойств, не оговоренные в стандарте, должны быть указаны в КД и/или НТД.

Для испытаний используют образцы, форма, размеры и допустимые отклонения которых оговорены в соответствующих стандартах (ГОСТ 1497-84, ГОСТ 24648-90, ГОСТ 2856-79 и др.).

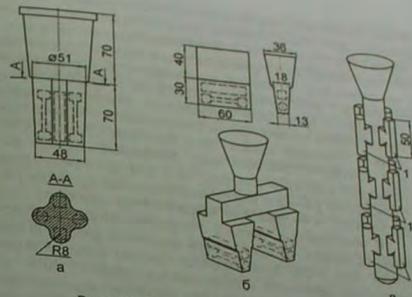


Рис. 14.2. Схемы модельных блоков проб а — трапециевидная проба; б — клиновидная проба в — модельный блок с приливами (1) брусками круглого и квадратного поперечного сечения

Механические свойства отливок определяют на образцах, выточенных из клиновидных, трапециевидных проб или приливных проб (пальчиковых) брусков со стожку проб после их соответствующей термической обработки (см. рис. 14.2).

В случае заливки КО непосредственно из тигля плавильной печи образцы на механические испытания вытачивают из заготовки «пальчикового» типа, прилитых к питающим элементам ЛПС.

В некоторых случаях образцы для механических испытаний вырезают непосредственно из тела отливки. При этом от внешней поверхности отливки. Число отливок, отбираемых для испытаний, регламентируется соответствующими техническими условиями на поставку. Следует отметить, что, как правило, показатели механических свойств, определенных на образцах, вырезанных из тела отливки, несколько ниже аналогичных проб (клиновидных, трапециевидных, приливных), что объясняется различными условиями затвердевания и питания сплава в процессе его затвердевания в отливке и

При изготовлении отливок, требующих индивидуального контроля механических свойств, допускается применять приливной пробный брусок, размеры и местоположения приливных брусков на отливках, предназначенных для КД и/или НТД. Место расположения представителя заказчика, устанавливается предприятием-изготовителем. В этом случае отделение приливных брусков от отливок проводят только после окончательной термической обработки отливок, поскольку условия изготовления пробных брусков и отливок должны быть одинаковыми.

**Контроль размеров отливок.** Объем контроля, периодичность его проведения, группы и методику проводимых измерений размеров отливки назначают исходя из сложности конструкции отливки или требований представителя заказчика. Размеры отливки контролируют путем ее обмера и сравнения с разметками, указанными в чертеже отливки. До начала обмера в ряде случаев проводят разметку отливки. В результате разметки и обмера в отливках выявляют величину их коробления, разностенности, «подутости», перекоса. Кроме того, разметка позволяет проверить наличие и величину припусков на обрабатываемых поверхностях отливки.

В условиях серийного и массового производства отливок контролируют только их некоторые основные размеры. Для осуществления этого контроля используют проходные и непроходные калибры (пробки), скобы. В условиях единичного и мелкосерийного производства отливок используют универсальный измерительный инструмент (штангенциркули, микрометры). В случае необходимости определения взаимного расположения отдельных поверхностей, а также для определения отклонений, отливки проверяют на специальных приспособлениях с помощью шаблонов и калибров. В условиях серийного производства для контроля профиля пера турбинных лопаток используют шаблоны (см. рис. 14.3, где  $\Delta$  — наибольшее отклонение данного внутреннего сечения профиля лопатки) и индикаторы часового типа на копире.



Рис. 14.3. Схема шаблона при контроле внутреннего профиля пера турбинной лопатки: 1 — турбинная лопатка; 2 — шаблон

В некоторых случаях с определенной периодичностью проводят проверку всех основных размеров отливки. Для этого отливку разрезают по заданным сечениям и проводят их разметку. Для резки используют одну или две отливки-представителя партии в 20...100 шт. В случае выявления заметных отклонений геометрических размеров недопустимых размеров в отливке-представителе бракуют всю партию отливок.

Разметку отливок проводят на разметочных столах (плитах) с помощью специальных шаблонов, а также с использованием различных измерительных инструментов и приспособлений.

Для контроля сложных, наиболее ответственных сечений из партии отливок в 50...200 шт отбирают две-три отливки-представителя, «защищающие» своим качеством всю партию отливок. С целью проведения контроля отливки-представители разрезают по определенным сечениям, вырезая из них темплеты. Впоследствии, используя полученные темплеты, проводят разметку с помощью проектора (компаратора).

При использовании проектора (компаратора) на листе бумаги предварительно вычерчивают теоретический профиль проверяемого сечения отливки, например, пера турбинной лопатки, в масштабе 10:1 или 20:1. Вырезанный строго по сечению темплет устанавливают на проектор, включают проектор и теневое изображение темплета, в заданном увеличении, наносят на кальку. Впоследствии изображение контуров реального профиля темплета на кальке совмещают с теоретическим профилем, вычерченным на бумаге, и выявляют отклонения между ними. Полученные данные по отклонению профилей используют для их последующей лекальной доводки.

Контроль геометрических размеров отливок также осуществляют на измерительной машине ЛК (Англия), компьютерной установке «Оптэл» (Россия), координатно-измерительной машине КИМ-G-90С и т.п. Для контроля толщины стенок используют негатовоскоп «Нева-рентген» (Россия) или компьютерный толщиномер «Panametric 25 DL».

Проверку всех размеров отливки проводят и в случае запуска в производство новой пресс-формы, после выхода пресс-формы из ремонта или после её длительной работы (для стальных пресс-форм — после 50...150 тыс. запрессовок, для алюминиевых пресс-форм — после 5...15 тыс. запрессовок, для пресс-форм из легкоплавких сплавов — после 1...2 тыс. запрессовок). Стальные пресс-формы, используемые для получения моделей из водорастворимых и, в осо-

бенности, керамических стержней, контролируют чаще (после 3...5 тыс. заливок/запрессовок), в связи с более интенсивным износом их рабочих поверхностей.

**Контроль шероховатости поверхности.** Шероховатость поверхности отливок контролируют с помощью эталонов или специальных приборов — профилометров (см. гл. 2).

**Поверхностные дефекты.** В зависимости от размера, поверхностные дефекты обнаруживают при визуальном контроле отливок или с использованием специальных методов, после чего их сравнивают с эталоном и принимают решение о пригодности отливки для дальнейшей работы с ней.

Невидимые невооружённым глазом поверхностные дефекты выявляют с помощью люминесцентной (ЛЮМ), цветовой (цветной) и магнитной дефектоскопии. Согласно ГОСТ 18442-80 класс чувствительности контроля каждого из методов определяется размерами выявляемых дефектов. В качестве основного параметра размера контроля (отливки) — так называемая ширина раскрытия дефекта.

Каждый из методов, методы капиллярной дефектоскопии имеют свои особенности чувствительности (минимальной и максимальной размер дефекта).

Согласно ГОСТ 18442-80 установлено 5 классов чувствительности (по нижнему порогу) в зависимости от размеров дефектов.

Для 1-го класса чувствительности (плиты) с помощью проектора (компаратора) на листе бумаги предварительно вычерчивают теоретический профиль проверяемого сечения отливки, например, пера турбинной лопатки, в масштабе 10:1 или 20:1. Вырезанный строго по сечению темплет устанавливают на проектор, включают проектор и теневое изображение темплета, в заданном увеличении, наносят на кальку. Впоследствии изображение контуров реального профиля темплета на кальке совмещают с теоретическим профилем, вычерченным на бумаге, и выявляют отклонения между ними. Полученные данные по отклонению профилей используют для их последующей лекальной доводки.

Для 1-го класса чувствительности — ширина раскрытия дефекта составляет менее 1 мкм.

Для 2-го класса чувствительности — от 1 до 10 мкм.

Для 3-го класса чувствительности — от 10 до 100 мкм.

Для 4-го класса чувствительности — от 100 до 500 мкм.

Технологический класс — не нормируется.

Капиллярные методы применяют для отливок, изготовленных из ферромагнитных материалов, если их магнитные свойства, форма, вид и месторасположение магнитопорошковым методом или магнитопорошковым методом контроля недопустимо применять по условиям эксплуатации отливки.

Обязательным условием выявления поверхностных дефектов (нарушений сплошности материала) капиллярными методами является отсутствие в полости дефекта какого-либо твёрдого или жидкого вещества. Кроме того, дефект должен иметь выход на поверхность исследуемой отливки и глубину залегания в её теле, значительно превышающую ширину раскрытия самого дефекта.

Сущность метода капиллярной дефектоскопии заключается в следующем [153; 304]. На очищенную поверхность контролируемой детали (отливки) наносят пенетрант — легкоподвижную жидкость. Под действием капиллярных сил пенетрант проникает в полости дефектов отливки, выходящих на её поверхность. После этого, с помощью очищающей жидкости пенетрант удаляют с поверхности детали (при этом пенетрант, попавший в полость поверхностных дефектов, остаётся в их полостях).

По окончании удаления пенетранта с поверхности отливки на неё наносят специальное вещество — проявитель. Присутствие проявителя на поверхности детали приводит к частичному удалению («вытягиванию») пенетранта из полостей поверхностных дефектов и локальной пропитке пенетрантом нанесённого слоя проявителя.

Появление пенетранта на поверхности слоя проявителя формирует индикаторный рисунок на поверхности детали (отливки) в месте расположения поверхностного дефекта.

Капиллярные методы контроля классифицируют в зависимости:

- от типа проникающего вещества (проникающих растворов, фильтрующихся суспензий);  
 - от способа получения первичной информации (яркой или ахроматической, цветной или хроматической, люминесцентной, люминесцентно-цветной).

Принцип люминесцентной дефектоскопии основан на ярком свечении рециркулирующего вещества (пенетранта) под источником невидимого глазом человека ультрафиолетового излучения. Для проведения люминесцентного контроля человека варительно очищенную и обезжиренную отливку погружают на 10...20 мин в флюоресцирующую жидкость (пенетрант), например, жидкость следующего состава (по массе): 85,7% очищенной нефти, 9,3% олеиновой кислоты и 5% триэтанолами-на. При этом жидкость, обладающая высокой проникающей способностью, заполняет полости, образованные поверхностными дефектами. Впоследствии с поверхности отливки флюоресцирующий слой смывают водой и после сушки отливки наносят тонкий слой тонкоизмельченного вещества-проявителя, например, талька, окиси магния и т.п. Нанесенный на поверхность отливки порошок адсорбирует флюоресцирующую жидкость, оставшуюся в полостях дефектов после промывки отливки водой, вытягивая её на свою поверхность. В таком виде отливку помещают под источник ультрафиолетового излучения, для чего используют ртутно-кварцевые лампы и увиолетовые стёкла. Места расположения и размеры дефектов на поверхности отливки при этом определяют по свечению адсорбированной веществе-м проявителем флюоресцирующей жидкости. При этом дефектные места на поверхности отливки светятся ярко-белым светом на практически чёрном фоне отливки (см. рис. 14.4).

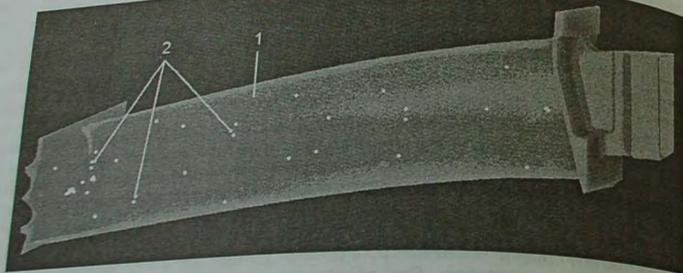


Рис. 14.4. Вид поверхностных дефектов на турбинной лопатке, выявленных методом люминесцентной дефектоскопии:  
 1 – отливка; 2 – поверхностные дефекты

В настоящее время на отечественных предприятиях, в основном, используют методы люминесцентной дефектоскопии ЛЮМ17-П и ЛЮМ1-ОВ, отличающиеся друг от друга уровнем чувствительности (по классификации ОСТ 190282-79 метод ЛЮМ17-П имеет третий класс чувствительности, а метод ЛЮМ1-ОВ – первый класс чувствительности).

Капиллярный цветовой метод неразрушающего контроля (ГОСТ 18442-80) основан на капиллярном проникновении внутрь дефекта индикаторной жидкости (пенетранта), хорошо смачивающей материал отливки, с последующей регистрацией индикаторных следов.

Данный метод пригоден для выявления несплошностей с поперечными размерами 0,1...500 мкм. Метод широко применяют для контроля целостности сварных швов.

Для выявления поверхностных дефектов отливок методом цветовой дефектоскопии красящий пенетрант наносят на поверхность отливки или сварного шва во внутренние полости поверхностных дефектов под действием капиллярных сил. Затем пенетрант удаляют с поверхности отливки. По прошествии некоторого времени пенетрант удаляют с поверхности отливки (сварного шва) и на эту поверхность наносят вещество-проявитель. Проявитель, наносимый на поверхность диффузии "вытягивает" оставшийся в дефекте пенетрант на поверхность контроля. Имеющиеся на объекте контроля поверхностные дефекты, представляющие собой линии различной толщины и протяженности или точки, представляющие в данном месте отливки (сварного шва) трещины, пор и т.п.

В цехах литья по выплавляемым моделям в настоящее время наиболее широкое распространение получил метод цветовой дефектоскопии ЦМ15-В. Класс чувствительности метода ЦМ15-В – второй, что позволяет выявлять поверхностные дефекты с величиной раскрытия равной от 1 до 10 мкм.

В методе цветовой дефектоскопии ЦМ15-В на предварительно обезжиренную и просушенную поверхность отливки методом двух-трех кратного окунания и валом в 2...3 мин кистью или пульверизатором наносят легкоподвижную краску красного цвета (пенетрант). Краска состоит из 10 г жирорастворимого темного оснove бензола и масла МК-8.

Через 2...3 мин после нанесения пенетранта его удаляют с поверхности отливки при помощи ветоши, смоченной в растворе керосина и трансформаторного масла в соотношении (7:3), и наносят ровный тонкий слой белой поглощающей краски. В состав поглощающей краски входят: 700 см<sup>3</sup> коллодия, 200 см<sup>3</sup> бензола, 100 см<sup>3</sup> ацетона и 50 г густотёртых цинковых белил.

После подсушки нанесенного на отливку слоя поглощающей краски, на её белой поверхности появляются розовые или красные линии и точки (красный индикаторный рисунок) в местах залегания поверхностных дефектов (см. рис. 14.5).

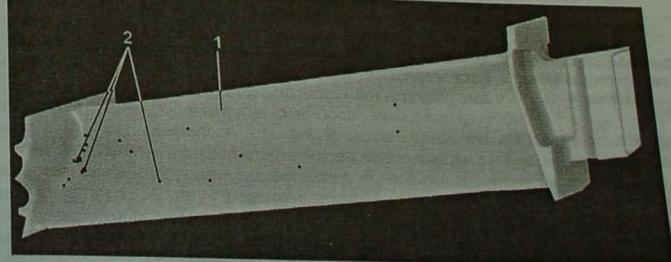


Рис. 14.5. Вид поверхностных дефектов на турбинной лопатке, выявленных методом цветовой дефектоскопии:  
 1 – отливка; 2 – поверхностные дефекты

С увеличением глубины и протяжённости поверхностного дефекта следы на белом фоне становятся ярче и больше.

Зачастую размеры выявляемых дефектов очень малы, в связи с чем контрольные линии и точки на белом фоне становятся едва заметными. Поэтому исследователи поверхности контролируемых луты и переносной лампы.

Магнитную дефектоскопию применяют для выявления поверхностных трещин (преимущественно шириной более 0,001 мм) и внутренних дефектов (трещины, газовые раковины, шлаковые включения, поры и пр.), залегающих на глубине до 2 мм, от контролируемой поверхности, в отливках из сплавов, обладающих магнитными свойствами. При этом оптимальная величина шероховатости поверхности отливки, исследуемой методом магнитной дефектоскопии, соответствует параметру  $Ra=2,5...1,25 \text{ мкм}$ .

Метод магнитной дефектоскопии основан на визуальной регистрации мест нахождения магнитного поля (магнитных силовых линий) намагниченной части металла в местах залегания её поверхности или подповерхностных дефектов. Для намагниченную отливку покрывают тонким слоем магнитного мелкодисперсного материала или суспензии, приготовленной на его основе.

Суть метода магнитной дефектоскопии состоит в следующем. После намагничивания отливки созданный в ней магнитный поток в бездефектной части отливки характеризуется строго определённым направлением, что при нанесении на поверхность отливки магнитного порошка обеспечивает его равномерное распределение по поверхности отливки.

В случае наличия на поверхности отливки или в её подповерхностной области участка (участков) с пониженной магнитной проницаемостью (например, трещин, дефектов нарушающих сплошность металла — трещин, Н.В. и т.д.), часть силовых линий магнитного поля отливки в этих местах претерпевает определённые искажения. В результате нарушений линейности магнитного потока в месте залегания дефекта возникают локальные магнитные полюсы (участки наибольшей концентрации магнитных силовых линий). Частицы магнитного порошка, попавшие в область действия такого локального поля, намагничиваются и притягиваются друг к другу, образуя цепочные структуры, ориентированные по магнитным силовым линиям этого поля.

В результате на поверхности отливки в месте залегания поверхностного или подповерхностного дефекта образуются наслоения магнитного порошка, в плане повторяющие размеры и контуры дефекта (см. рис. 14.6).

Наслоение порошка с чётко очерченными границами свидетельствует о наличии поверхностного дефекта, наслоение порошка с расплывчатыми границами — о наличии подповерхностного дефекта в теле отливки.

Наибольшая вероятность выявления дефектов магнитопорошковым методом достигается в случае, когда плоскость дефекта составляет угол  $90^\circ$  с направлением намагничивающего поля (магнитного потока). С уменьшением этого угла чувствительность метода снижается и при углах, существенно меньших  $90^\circ$ , дефекты могут быть не обнаружены.

Чувствительность магнитопорошкового метода определяется: магнитными характеристиками материала контролируемой отливки — магнитной индукцией (В), остаточной намагниченностью (Br), максимальной магнитной проницаемостью ( $\mu_{max}$ ), коэрцитивной силой ( $H_0$ ), а также шероховатостью поверхности контроля,

напряженностью намагничивающего поля, его ориентацией по отношению к плоскости дефекта, качеством дефектоскопических средств и освещённостью контролируемой поверхности. Магнитопорошковый метод контроля состоит из:

- подготовки поверхностей отливки к контролю;
- намагничивания отливки;
- нанесения на поверхность отливки магнитной суспензии (порошка);
- осмотра поверхностей отливки, размагничивания отливки;
- контроля качества процесса.

В качестве индикаторных средств в методах магнитопорошкового контроля применяют либо сухой магнитный порошок ("сухой" способ), либо магнитный порошок в составе суспензии ("мокрый" способ). Основным условием надежного выявления дефекта является равномерное нанесение магнитного порошка (или магнитной суспензии) на поверхность намагниченной отливки.

В цехах литья по выплавляемым моделям наиболее широкое распространение получил "мокрый" способ магнитопорошковой дефектоскопии. Для его реализации используются специальные суспензии на водной, масляной или керосиновой основе, содержащие 15...25 г магнитного порошка (размер частиц порошка — 0,1...10 мкм) в 1 л жидкости (воды, масла, керосина). Помимо порошка, в суспензию вводят вещества, улучшающие смачиваемость суспензий поверхности отливки, а также антикоррозионные добавки.

Основными критериями оценки качества используемой суспензии и порошка являются: ферромагнитные свойства частиц магнитного порошка, нетоксичность, хороший цветовой контраст, высокая устойчивость "рисунка" в месте расположения дефекта отливки, низкая остаточная намагниченность, размер и однородность частиц, стойкость к коррозии.

Из достаточно большого числа используемых магнитных суспензий в настоящее время наиболее широко используют магнитные суспензии, состав которых приведен в табл. 14.1 [4].

Состав магнитных суспензий

Таблица 14.1

Вещество	Содержание в магнитной суспензии				
	1	2	3	4	5
Чёрный магнитный порошок, г	15-25				
Керосин, дм <sup>3</sup>	0,5				
Масло трансформаторное, дм <sup>3</sup>	0,5				
Масло РМ, дм <sup>3</sup>	1				
Хромпик калиевый, г	3-5				
Сода кальцинированная, г	9-11				
Вещество вспомогательное ОП-7 или ОП-10, г	4-6				
Натрий углекислый, г	9-11				
Мыло хозяйственное, г	10-20				
Вода, дм <sup>3</sup>	1	1	1	1	1

Для приготовления магнитных суспензий также используют специальные пасты, производимые промышленностью (паста чёрная водная ЧВ-1, паста красная водная KB-1, паста красная масляно-керосиновая KM-K и т.п.). Основным преимуществом использования готовых паст для приготовления магнитных суспензий является простота приготовления суспензии. В этом случае для использования пасту достаточно разбавить определённым количеством дисперсионной среды (растворителем магнитной суспензии).



Рис. 14.6. Вид поверхностной трещины при контроле магнитопорошковым методом

Проведение магнитопорошковой дефектоскопии осуществляется на стационарных универсальных дефектоскопах УМДС-10000, МДС-1,5 (Россия), УН 350 (Германия) и т.п.

**Внутренние дефекты.** Для контроля внутренних дефектов изделий используют рентгено-, гамма- и бетатронную радиографию.

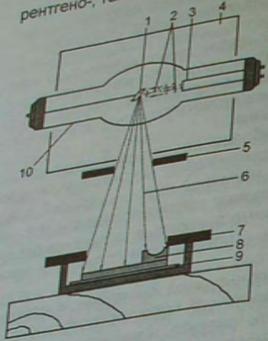


Рис. 14.7. Схема просвечивания отливки

Рентгенография – это метод получения изображения предмета просвечиваемого рентгеновским излучением. При этом метод предполагает расположение исследуемого объекта между источником рентгеновского излучения и кассетой с рентгеновской плёнкой (см. рис. 14.7, где обозначены: 1 – анод; 2 – электроны; 3 – катод; 4 – рентгеновские лучи; 5 – свинцовая диафрагма; 6 – бленда; 7 – защитные свинцовые листы; 8 – отливка; 9 – кассета с рентгенографической плёнкой; 10 – рентгеновская трубка).

Метод рентгенографии основан на способности рентгеновского излучения вызывать почернение (потемнение) эмульсии рентгеновской плёнки после её проявления. Степень почернения отдельных участков рентгеновской плёнки зависит от величины поглощённой дозы рентгеновского излучения. В свою очередь, при всех прочих равных условиях, поглощённая доза излучения (см. рис. 14.8, где обозначены: 1 – источник рентгеновских лучей; 2 – стенка отливки; 3 – газовая раковина; 4 – стальное включение; 5 – экран; 6 – материал-поглотитель излучения) зависит от толщины и однородности материала-поглотителя излучения (стенки отливки).

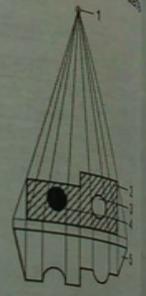


Рис. 14.8. Схема просвечивания отливки из магниевого сплава рентгеновским излучением и эквивалентности излучения за стенкой отливки

То есть, если в стенке отливки присутствует усадочная пористость, газовые раковины, трещины и т.п., то на рентгеновской плёнке на сером фоне бездефектной части просвеченной стенки отливки дефекты будут иметь вид более светлых пятен, соответствующих по форме и размерам реальным дефектам. При этом чем ниже плотность вещества, заполняющего полость дефекта, и чем больше размеры дефекта в направлении просвечивания, тем более темным и отчётливым становится его изображение на рентгеновском снимке (плёнке). Напротив, если плотность вещества, заполняющего полость дефекта, выше плотности материала отливки, то такой дефект на сером фоне негативного изображения контролируемого участка отливки будет выглядеть более светлым (см. рис. 14.9).

Если при просвечивании стенок отливки дефекты на снимках не обнаружены, то это не означает, что их там нет. Поскольку каждый метод дефектоскопии имеет определённый уровень чувствительности, то в данном случае, при не обнаружении дефекта, может оказаться, что веро-

ятный дефект во время рентгенирования был расположен таким образом, что при выбранном режиме и схеме просвечивания отливки он не выявляется. Кроме того, дефект может иметь слишком малые размеры или дефект, например микропористость, может равномерно располагаться по всей контролируемой площади стенки отливки и, создаваемый дефектом фон, принимают за фон плотной бездефектной стенки отливки. При этом может оказаться, что отливка с сосредоточенной в одной части выявленной рентгенографией и классифицированной как недопустимый дефект, на испытании герметичности и классифицированной как недопустимый дефект, на испытании пневмоплотности, в то время как выявленной рассредоточенной пористостью – даст течь.

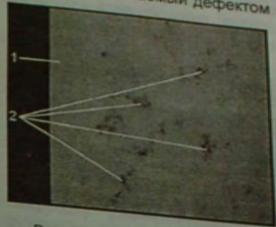


Рис. 14.9. Фрагмент негатива рентгеновского снимка плоской стенки отливки (1) с рыхлотами (2)

Чувствительность рентгенографического метода зависит от энергии источника первичного излучения, рассеянного излучения, плотности металла отливки и толщины контролируемой стенки отливки, формы, ориентации и места расположения дефекта, величины фокусного расстояния (F) и фокусного расстояния контролируемой стенки отливки. Чувствительность контроля тем выше, чем меньше энергия излучения и больше толщина контролируемой стенки отливки, для стали, представленные на рис. 14.10 [4]. Для построения зависимостей, представленных на рис. 14.10, чувствительность метода (K) определена по формуле (%):

$$K = 100 \cdot \frac{l_d}{\delta} \quad (14.1)$$

где  $l_d$  – протяжённость дефекта в теле контролируемой стенки отливки в направлении просвечивания, мм;  $\delta$  – толщина контролируемой стенки в месте обнаружения дефекта, мм.

Например, согласно рис. 14.10 и формуле (14.1), при энергии рентгеновского излучения  $U=80$  кВ, фокусном расстоянии  $F=750$  мм и использовании радиографической плёнки РТ-1, в стенке стальной отливки толщиной 4 мм могут быть выявлены дефекты с размером (в направлении просвечивания) более:

$$l_d = \frac{K \cdot \delta}{100} = \frac{1 \cdot 4}{100} = 0,04 \text{ мм.}$$

Поскольку рассчитанное значение  $l_d=0,04$  мм, что составляет 1% от толщины стенки отливки  $\delta=4$  мм, то в этом случае можно сказать, что

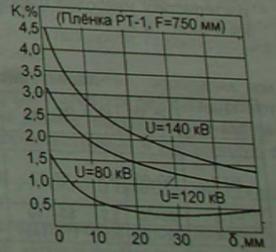


Рис. 14.10. Зависимость чувствительности радиографического контроля от энергии излучения рентгеновского аппарата РУП-150-10 и толщины стенки стальной детали

при данных условиях проведения контроля использованный метод позволяет выявлять усадочную пористость в стенке отливки величиной не менее 1%.

Дефекты отливок, расположенные своей наибольшей протяженностью в стенках параллельно направлению распространения излучения, выявляются значительно лучше благодаря большей резкости границ дефектов, получаемых на рентгенографической плёнке, что поясняется эпорой интенсивности излучения от стенки отливки, представленной на рис. 14.11.

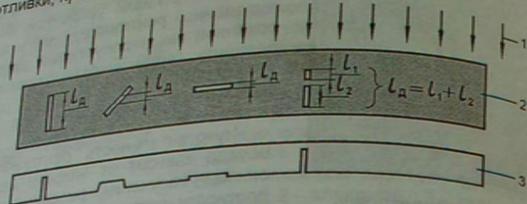


Рис. 14.11. Схемы некоторых типов расположения дефектов в стенках отливок  
1 – рентгеновское излучение; 2 – стенка отливки;  
3 – эпора интенсивности излучения за стенкой отливки

Увеличение фокусного расстояния, как и ослабление энергии излучения, делает его более мягким, что повышает чувствительность рентгеновского контроля. При увеличении фокусного расстояния резко возрастает время просвечивания, с уменьшением размера фокуса получают более чёткий контур изображения дефекта на снимке, повышается чувствительность контроля.

Для проведения рентгеновского контроля той или иной отливки фокусное расстояние выбирают в зависимости от принятой схемы просвечивания, толщины просвечиваемой стенки отливки и размеров активной части (фокусного пятна) источника излучения.

Радиографическая плёнка является основным средством регистрации ионизирующего излучения, прошедшего через тело отливки. Основные технические характеристики наиболее широко используемых радиографических плёнок приведены в табл. 14.2.

Характеристики радиографических плёнок

Таблица 14.2

Тип плёнки	Ч*, р <sup>-1</sup>	КК	РС, мм <sup>-1</sup>	Преимущественная область применения, общая характеристика
Безэкранные				
РТ-1	50-60	3,5	68-73	Контроль качества отливок, а также сварных соединений больших толщин. Обладает высокой контрастностью и чувствительностью к излучению.
РТ-3	20-30	3,9	80-110	Контроль отливок из алюминиевых сплавов и сплавов на основе железа.
РТ-4	9-12	3,5	110-140	
РТ-5	3-5	3,5	140-180	Контроль качества отливок, а также ответственных сварных соединений. Обладает весьма высокой контрастностью.
Экранированные				
РТ-2	350	3,0	73-78	Универсальная плёнка. Требует наименьшего времени просвечивания контролируемой стенки отливки. Используют для контроля отливок различной толщины.

Примечание. \* Ч – чувствительность; КК – коэффициент контрастности; РС – разрешающая способность.

Для ориентировочного выбора марки той или иной радиографической плёнки, в зависимости от толщины контролируемой стенки стальной отливки ( $\delta$ ) и энергии рентгеновского излучения ( $U$ ), можно воспользоваться номограммой, представленной на рис. 14.12 [4].

В цехах литья по выплавляемым моделям для рентгенографического контроля качества отливок используют рентгеновские аппараты кабельного типа различных производителей марок РУП-150-10-1, РУП-150/300-10 (Россия), ISOVOLT (Германия) и т.п.

Для просвечивания поверхности отливки очищают от остатков КО, пригара и других загрязнений.

После получения снимков отливок или их отдельных стенок проводят расшивку снимков (рентгенограмм). Расшивку рентгенограмм (по сухому снимку) осуществляют в проходящем свете на неготовоскопе – приспособлении, в котором осветительные лампы закрыты “молочным” или матовым стеклом, создающим равномерный рассеянный световой поток. В процессе расшивки помещение затемняют во избежание отражения от плёнки падающего на неё света.

В процессе расшивки рентгенограммы осуществляют оценку качества полученного изображения, анализируют изображение (рентгенограмма не должна иметь пятен, полос, отпечатков пальцев, загрязнений и поврежденный эмульсионного слоя, затрудняющих расшивку) и отыскивают на нём изображения дефектов, составляя впоследствии заключение о качестве отливки.

Если контролируют сварное соединение отливки, то проводят оценку оптической плотности, которая, в соответствии с ГОСТ 7512-82, должна составлять 1,4...4,0 (оптическую плотность измеряют на денситометрах или на микрофотометрах), и проверяют видимость элементов эталона чувствительности, гарантирующих видимость на рентгенограмме недопустимых дефектов.

Выявленные дефекты очерчивают на рентгеновском снимке, определяя при этом их размеры или занимаемые на снимке площади. Размером дефекта считают наибольший линейный размер его изображения на снимке, выраженный в миллиметрах или площадь, занимаемую дефектом на рентгенограмме и выраженную в см<sup>2</sup>.

На основании полученных данных принимают решение о пригодности каждой конкретной отливки для дальнейшей работы с ней.

**Контроль герметичности отливок.** Герметичность – одно из основных условий работоспособности многих систем, аппаратов, узлов и приборов. Степень герметичности той или иной литой детали (допустимую величину обмена) назначают исходя из условий обеспечения нормального течения рабочего процесса в изделии, для реализации которого, собственно, и осуществляется герметизация. Герметичность литой детали оценивают либо степенью её герметичности, либо наличием в детали течи. Степень герметичности характеризуют количеством вещества, перетекающего через её стенки в единицу времени. При этом герметичной считают ли-

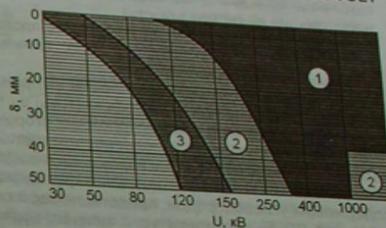


Рис. 14.12. Номограмма областей применения радиографических плёнок при просвечивании стали: 1 – РТ-5, РТ-4; 2 – РТ-1, РТ-3; 3 – РТ-2

тую деталь, у которой газовой или жидкостный обмен через стенки не превышает допустимого уровня.

Причинами газовой или жидкостного обмена, то есть причины нарушения герметичности, может быть проницаемость материала литой детали с нарушенной структурой (что учитывают при конструировании соответствующих изделий) либо сквозные дефекты (течи) в структуре материала литой детали, которые вызваны, как правило, наличием усачной пористости, микротрещин или окисными плёнами в её стенках (течь — это сквозной канал в стенке отливки, нарушающий её герметичность).

Испытания отливок на герметичность проводят методами течеискания — одним из видов неразрушающего контроля, выявляющим наличие в стенках отливок сквозных дефектов (течей).

Все методы течеискания основаны на принципе регистрации пробных веществ, проникающих через сквозной дефект (течь) в стенке отливки. Как правило, в направлении давления с противоположных сторон стенки отливки, в виде градиента давления с противоположной жидкости (вода, керосин и т.п.), газы (воздух, гелий и т.п.) или пар легкоиспаряющейся жидкости, например, хладона (хладон — техническое название группы насыщенных алифатических галогеноидов, содержащих углеводородов, представляющих собой при нормальных условиях газ, например  $CCl_2F_2$  с температурой кипения  $t_{кип} = -29,8^\circ C$ , или легкоиспаряющийся газ, например  $CCl_3F$  с температурой кипения  $t_{кип} = 23,7^\circ C$ . Хладоны не токсичны, не образуют взрывоопасных смесей с воздухом, не реагируют с большинством металлов).

В зависимости от состояния пробного вещества при нормальных условиях вом металлов).

В зависимости от состояния пробного вещества при нормальных условиях вом металлов).

В зависимости от состояния пробного вещества при нормальных условиях вом металлов).

К числу наиболее распространённых методов течеискания при контроле герметичности отливок относятся методы: пузырьковый, жидкостный и масс-спектроскопический.

**Пузырьковый метод.** Суть пузырькового метода состоит в регистрации пузырьков пробного газа (воздуха, гелия, смеси водорода и эфира), проникающего через течи в стенках отливки, погружённой в жидкость (воду) или покрытой слоем раствора мыла в воде или другим раствором, способным образовывать пузырьки.

В зависимости от требований к герметичности литой детали испытания на герметичность отливок могут проводить при давлении до 22 МПа и более.

Для проведения испытания (см. рис. 14.13) внутреннюю полость отливки 1 герметизируют с помощью крышек 2 (заглушек, пробок с резиновыми прокладками) и через штуцер 3 во внутреннюю полость отливки под давлением подают проникающий газ. Впоследствии испытуемую отливку погружают в воду или покрывают слоем мыльной воды и с помощью лупы 2-х...4-кратного увеличения или без неё наблюдают на предмет появления пузырьков на внешней поверхности отливки. Места выделения пузырьков на поверхности отливки соответствуют местам расположения течи в стенках отливки.

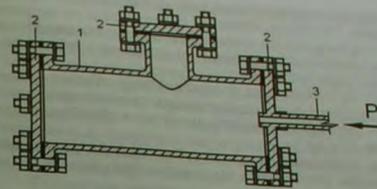


Рис. 14.13. Схема установки заглушек на отливку

В случае использования высокого давления испытанная отливка на герметичность проводят в специальной бронекамере, оснащённой видыми окнами с многослойным ударопрочным стеклом или видеокамерами наблюдения.

**Жидкостный метод.** Суть жидкостного метода состоит в регистрации мест проникновения проникающей жидкости сквозь стенку испытуемой отливки в местах течи. Для испытания отливку герметизируют так же, как и в случае её испытаний проникающим газом (см. рис. 14.13). Для создания градиента давлений (до 30 МПа) проникающую жидкость регистрируют как визуально, так и по величине падения (снижения) давления внутри испытуемой отливки, в течение определённого времени её выдержки под давлением.

Наиболее простым и доступным способом проверки герметичности отливки является её заполнение керосином с последующей выдержкой в течение нескольких часов. В случае наличия в стенке отливки течей керосин появится на её внешней поверхности в местах выхода течи.

**Масс-спектроскопический метод контроля.** Суть масс-спектроскопического метода состоит в регистрации молекул гелия, проникающих во внутреннюю полость отливки при обдуве внешней поверхности отливки струёй гелия и создании внутри отливки определённого вакуума.

Для регистрации гелия внутреннюю полость отливки герметизируют и вводят в неё гелиевый течеискатель, позволяющий обнаружить одну молекулу гелия среди 10 миллионов молекул воздуха.

**Контроль структуры отливки.** Изучение структуры сплава является задачей металлографии, в результате решения которой должна быть установлена связь между качественными и количественными характеристиками структуры, с одной стороны, и физическими, химическими, механическими, технологическими и эксплуатационными свойствами сплава — с другой.

В условиях текущего производства отливок, структуру металла отливок исследуют для установления причин отклонения свойств металла от требуемых значений или для установления соответствия требованиям технических условий.

Для исследования структуры металла используют пробу на излом, проводят макро- и микроисследования.

Наиболее простым и оперативным, но наименее информативным, методом исследования структуры, не требующим специального приборного обеспечения, является изучение излома металла. Излом изучают на разрывных или ударных образцах после их испытаний, на пробных планках или специальных приливных образцах, выполненных на ЛПС отливки.

По результатам исследований вида излома определяют тип макроструктуры, оценивают чистоту и пластичность металла, величину зерна, наличие включений хрупкой структурной составляющей, глубину прокаливаемости закалённых отливок и т.п.

По сравнению с пробой на излом, макроисследования являются более информативным способом исследований структуры металла. В результате проведения макроисследований выявляют фазовый состав сплава, оценивают его кристаллическое строение, химическую раковины, засор и т.п. трещины, газовые и шлаковые раковины, засор и т.п.

Макроисследования проводят на специально подготовленных образцах (шаблонных фаях) и темплатах, вырезанных, как правило, из определённого сечения тела отливки. Для проведения исследований образцы и темплеты шлифуют и обрабатывают в специальных растворах [27; 39; 58; 63 и др.].

Исследования макроструктуры проводят без приспособлений либо с использованием пуля, либо с использованием оптического микроскопа при увеличении до 25 раз (крат).

Визуальный контроль макроструктуры обработанной и травленной поверхности отливок проводят, например, при получении турбинных лопаток с равносторонней макроструктурой (в случае применения поверхностного модифицирования), лопаток с направленно-столбчатой, монокристаллической или гранулярной макроструктурой.

В результате проведения исследований определяют характер распределения и количество структурных составляющих, определяют характер микродефектов, размеры, количество и природу Н.В. и т.д.

Макроисследования проводят на специально подготовленных образцах вырезанных, как правило, из определённого сечения тела отливки, либо на самих отливках.

Исследования микроструктуры проводят на полированных и травлёных в специальных химических реактивах, шлифах, с использованием оптического микроскопа (например, МИМ-7, МИМ-8 и т.п.) при увеличении до 2000 раз, в обычном и поляризованном свете. Для более тонких исследований микроструктуры используют электронно-лучевые или ионные микроскопы с увеличением в 10...500 тыс. раз.

**Контроль кристаллографической ориентации.** Как правило, этому виду контроля подвергают 100% турбинных лопаток, полученных способами направленной кристаллизации, а также затравок, используемых для получения этих отливок.

Контроль осуществляют методом рентгеновской съёмки неподвижного кристалла с регистрацией отражений на плёнку на автоматизированных компьютерных установках, предназначенных для проведения рентгеноструктурного анализа (например, дифрактометрах мод. "ДРОН-3М", "ДРОН-4" или "ДРОН-4М").

Определение кристаллографической ориентации турбинных лопаток осуществляют по элементам стартовых конусов, для чего от лопатки отрезают стартовый конус по плоскости, строго перпендикулярной её оси.

**Контроль массы отливок.** Точность отливок по массе устанавливают по результатам их взвешивания.

**Прочие параметры контроля.** Помимо вышеуказанных, существуют и другие контролируемые параметры, методы и методики определения которых регламентированы в соответствующих ГОСТ.

В частности, определение толщины обезуглероженного слоя отливок проводят по ГОСТ 1763-68, испытание на жаростойкость – по ГОСТ 6130-71, испытание на стойкость против межкристаллитной коррозии – по ГОСТ 6032-2003, определение структуры серого чугуна с пластинчатым графитом, высокопрочного чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом, а также ковкого чугуна с компактным графитом – по ГОСТ 3443-87 и т.д.

## Глава 15. БРАК И КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ОТЛИВОК

Заключительным этапом производства отливок является контроль их качества, для отливок особо ответственного и специального назначения (ОТК) и, как правило, или Государственной приёмки.

Согласно ГОСТ 15467-79 качество продукции (отливки, литой детали) – это совокупность её свойств, обуславливающих пригодность отливки удовлетворять потребности – проверка соответствия в соответствии с её назначением. Контроль качества установленным требованиям.

Показатель качества отливки – количественная характеристика одного или нескольких свойств отливки, входящих в её качество, рассматриваемая применительно к определенным условиям её создания и эксплуатации.

В настоящее время в литейных цехах определение значений показателей качества отливок (литых деталей) осуществляют, в основном, измерительным методом. Измерительный метод – метод определения значений показателей качества отливки (литой детали), осуществляемый на основе технических средств измерений.

Допускаемое отклонение показателя качества продукции определяют сопоставлением фактического и номинального значений этого показателя. Отклонение считается допускаемым (допустимым), если фактическое значение показателя каковой отливки (литой детали) не выходит за пределы, установленные нормативной документацией. Выход фактического значения показателя за установленные пределы означает, что рассматриваемая отливка (литая деталь) имеет дефект.

Допускаемое (допустимое) отклонение может характеризоваться, например, глубиной и площадью вмятин (раковин, спаев, засоров, царалин и т.п.) на поверхности отливки, а также их числом, если их значения не превосходят предельных величин. При этом номинальные значения, от которых в данном случае отсчитываются допускаемые отклонения, приравнивают нулю.

В результате оценки качества из общего числа произведенных отливок выделяют часть отливок, называемую годной продукцией (годными отливками).

Годные отливки – это отливки, удовлетворяющие всем установленным на них требованиям. То есть отливки, у которых совокупность регламентированных показателей качества (ГОСТ 4.439-86) соответствует техническим условиям и другой НТД, относятся к годным.

Условно годные отливки – это отливки, имеющие небольшие отклонения от установленных требований (малозначительные дефекты, не оказывающие существенного влияния на эксплуатационные показатели отливки или изделия в целом). Условно годные отливки допускают к дальнейшей обработке и используют по своему назначению с разрешения главных специалистов промышленных предприятий, по результатам тщательной оценки дефектов.

Оставшаяся часть отливок относится к категории брака и характеризуется наличием в отливках дефектов. Брак – это отливки, передача которых потребителю не допускается из-за наличия в отливках дефектов. Дефект – это каждое отдельное несоответствие отливки (продукции) установленным требованиям. Дефектная отливка – это отливка, имеющая хотя бы один дефект.

При разработке НД на производимые отливки (главным образом, при установлении методов контроля изготавливаемых отливок) все возможные дефекты подразделяют на критические, значительные и малозначительные.

Критический дефект – дефект, при наличии которого использование отливки по назначению практически невозможно или недопустимо.

Значительный дефект — дефект, который существенно влияет на использование отливки по назначению и (или) на ее долговечность, но не является критическим.

Малозначительный дефект — дефект, который существенно не влияет на использование отливки (по назначению) и ее долговечность.

Такое разделение основано на оценке степени влияния каждого рассматриваемого дефекта на эффективность и безопасность использования литой детали с учетом ее назначения, устройств, показателей ее качества, режимов и условий эксплуатации.

Указанное разделение дефектов проводят для последующего выбора вида контроля качества продукции (выборочный или сплошной) и для назначения такой характеристики выборочного контроля, как риск потребителя (заказчика).

Чтобы не пропустить критический дефект, контроль отливок (продукции) должен быть сплошным и в ряде случаев — неоднократно. Контроль отсутствия значительного дефекта допускается осуществлять выборочно только при достаточно низком значении риска потребителя. Отсутствие малозначительного дефекта может контролироваться выборочно при относительно высоком значении риска потребителя.

Для некоторых видов отливок определенная совокупность дефектов, каждый из которых при отдельном его рассмотрении является малозначительным, могут быть эквивалентны значительному или даже критическому дефекту и должны относиться к соответствующей категории. В то же время совокупности значительных или эквивалентных малозначительным дефектам, аналогичным образом, могут быть эквивалентны критическому дефекту, предъявляемых к отливке, выявленные в результате технического контроля дефекты разделяют на устранимые и на неустранимые.

Устраняемый дефект — дефект, устранение которого технически возможно и экономически целесообразно. Неустраняемый дефект — дефект, устранение которого технически невозможно или экономически нецелесообразно.

Устранимость или неустранимость дефекта определяют применительно к рассматриваемым конкретным условиям производства и ремонта отливок с учетом необходимых затрат и других факторов. Один и тот же дефект может быть отнесен к устранимым или неустраняемым в зависимости от того, обнаружен он на ранних или на заключительных этапах технологического процесса производства (ремонта).

Неустраняемые дефекты могут переходить в категорию устранимых также в связи с совершенствованием технологии производства (ремонта) отливок и снижением затрат на исправление брака.

Соответственно, в зависимости от вида выявленных в отливке дефектов, их размеров, количества, мест расположения и пр., виды брака делят на брак исправимый и брак неисправимый.

Исправимый брак — это брак, все дефекты в котором, обусловившие забракование отливки, являются устранимыми. Такие отливки после устранения дефектов (ремонта отливок) допускают к дальнейшей обработке и использованию по назначению.

Неисправимый брак — это брак, в котором хотя бы один из дефектов, обусловивших забракование отливки, является неустраняемым. К категории неисправимого (окончательного) брака относят отливки, имеющие такие дефекты, исправление которых технически невозможно или экономически нецелесообразно, либо качество исправления которых невозможно проконтролировать. Забракованию подлежит любая отливка, имеющая хотя бы один неустраняемый дефект.

Помимо указанных видов брака, существует брак условный. К числу условного брака относят отливки, дефекты которых таковы, что даже при наличии данных дефектов допускается работа отливки в изделии. Такие отливки не ремонтируют, однако их пускают в дальнейшее производство с соответствующей картой отклонений по качеству, по согласованию с конструктором и заказчиком продукции.

Возможность устранения того или иного дефекта отливки определяют соответствующие специалисты (специалист) применительно к конкретным условиям производства и ремонта отливок.

Помимо вышеприведенной классификации, дефекты отливок делят на явные и скрытые. Явный дефект — это дефект, для выявления которого в НД, обязательной для данного вида контроля, предусмотрены соответствующие правила, методы и средства. Скрытый дефект — дефект, для выявления которого в НД, обязательной для данного вида контроля, не предусмотрены соответствующие правила, методы и средства.

Деление дефектов на явные и скрытые обусловлено предусмотренными правилами, методами и средствами контроля качества продукции.

К правилам технического контроля относят его распорядок (регламент, график), к методам — технологию (способы, приемы, последовательность операций), объем (число контролируемых показателей или параметров) и точность.

К средствам контроля относят используемое оборудование (стенды, испытательные машины и т.п.), измерительную и регистрирующую аппаратуру, а также инструменты и приборы.

Многие явные дефекты отливок выявляют в процессе внешнего осмотра отливки (визуально). Однако, если НД предусмотрена проверка отсутствия какого-либо дефекта инструментом или прибором, то такой дефект относят к категории явных, несмотря на невозможность его визуального обнаружения.

Скрытые дефекты выявляют в процессе механической обработки отливок или в процессе эксплуатации изделий, а также при дополнительном контроле литой детали не предусмотренными в технологических картах методами и средствами. Наиболее нежелательно и опасно, когда скрытый дефект литой детали проявляется сразу при ее присутствии в процессе эксплуатации изделия и может вызвать аварийную ситуацию.

Неисправимый брак отливок (окончательный брак), выявленный в пределах литейного цеха, называют внутренним (внутрицеховым) браком. Соответственно, брак отливок, выявленный за пределами литейного цеха, например, при механической обработке отливки в механическом цехе, в процессе сварки или сборки узла изделия и т.п., а также в процессе эксплуатации изделия, называют внешним браком. Наиболее опасными и «затратными» являются скрытые дефекты, обнаруживаемые на более поздних этапах использования литой детали (внешний брак), поскольку к стоимости отливки добавляется стоимость ее последующей обработки, при которой выявляют скрытый дефект.

Величина внешнего брака отливок зависит от достаточно большого числа факторов и, как правило, не превышает 3% для отливок групп 1 и 2, а для отливок группы 3 (отливок особо ответственного и специального назначения) может достигать 7% и более.

В литейных цехах каждую забракованную отливку классифицируют по видам брака. Результаты классификации видов брака отливок (результаты разбраковки отливок) фиксируют в соответствующем журнале с указанием количества общего числа отливок данного наименования, прошедших контроль, в том числе годных и забракованных отливок из числа отливок, подвергшихся контролю.

Величина брака отливок в том или ином литейном цехе зависит от технического уровня (степени механизации и автоматизации основных и вспомогательных технологических операций, качества используемых материалов, объема пооперационного контроля и пр.), принятой в цехе технологической схемы производства отливок культуры производства, требований к качеству отливок и т.п.

В зависимости от принятой технологической схемы производства отливок используемых материалов, требований к качеству отливок и пр., уровень и превалирующие виды брака в различных литейных цехах — не одинаковы. В качестве примера в табл. 15.1 представлены усредненные значения общего уровня внутреннего брака стальных отливок обемашинностроительного назначения, а также процентные значения того или иного вида брака в общем объеме забракованных отливок. Данные, представленные в табл. 15.1, носят обобщенный характер и составлены по результатам обследования ряда литейных цехов, серийно производящих литье массой до 2 кг из конструкционной нелегированной стали.

Таблица 15.1  
Усредненные данные уровня и видов брака для цехов стального литья по выплавляемым моделям

Брак	Доля вида брака в общем количестве забракованных отливок, %		
	1*	2	3
Спаи, недолив	25-35	15-35	3
Засор	30-45	40-50	10-20
Некачественная модель	5-12	5-12	50-65
Механическое повреждение отливки	5-10	5-15	5-12
Горючие трещины	До 5	До 3	До 5
Коробление	До 1	До 1	До 3
Шлаковые включения	До 3	До 1	До 5
Газовые раковины	До 1	До 1	До 1
ПРОЧИЕ	До 25	До 15	До 1
ОБЩИЙ	15-35	8-22	До 10
			45-65

Примечание. \*1 — отливки получены в четырёхслойные КО, изготовленные на основе кварцевого песка, пылевидного кварца и ГРЭС с эфиральдегидной фракцией ( $M=0,55...0,60$ ), прокалённые при  $850^{\circ}\text{C}$  на агрегате карусельного типа с последующей формовкой в кварцевый песок с температурой  $50...200^{\circ}\text{C}$ ; 2 — отливки получены в четырёхслойные КО, изготовленные на основе кварцевого песка, пылевидного кварца и ГРЭС с эфиральдегидной фракцией ( $M=0,55...0,60$ ), прокалённые в опорном наполнителе (кварцевом песке) при  $950...980^{\circ}\text{C}$ ; 3 — отливки получены в комбинированные четырёхслойные КО, у которых первые два слоя изготовлены на основе кварцевого песка, пылевидного кварца и ГРЭС ( $M=1,0...1,5$ ), а последние два слоя изготовлены на основе жидкого стекла. КО предварительно прокаливали при  $720...750^{\circ}\text{C}$ , охлаждали до комнатной температуры, ремонтировали и, после формовки в кварцевый песок, нагревали в течение 3 ч в проходной газовой печи с температурой  $950^{\circ}\text{C}$ .

Рассматривая вопрос о величине того или иного вида брака отливок следует отметить, что в цехах литья по выплавляемым моделям применяют две методики набора статистической информации о величине и видах брака производимых отливок. Первая методика основана на проведении ступенчатого контроля и учёта брака отливок. Вторая методика основана на полном (тотальном) контроле всех без исключения отливок исследуемой партии по всем видам дефектов.

Согласно методике проведения ступенчатого контроля, расчёт величины каждого конкретного вида дефектов отливок осуществляют на основании данных, полученных на каждом этапе проведения контроля качества отливок без учёта отливок, отбракованных на более ранних этапах контроля и, соответственно, не иссле-

дованных на более поздних этапах контроля. Согласно методике проведения тотального контроля, контролируют все без исключения отливки из данной партии, по всем без исключения видам дефектов и только после этого проводят расчёт доли отливок, имеющих тот или иной дефект.

В качестве примера в табл. 15.2 приведены данные, полученные в результате проведения ступенчатого и тотального контроля 200 шт направленно-кристаллизованных турбинных лопаток из жаропрочного никелевого сплава. Величина общего брака исследованной партии турбинных лопаток составила 65%.

Таблица 15.2  
Величина брака исследованной партии турбинных лопаток

Номер этапа контроля (название этапа)	Вид брака	Величина брака (в % от общего числа отливок в партии) при проведении по схеме контроля:	
		ступенчатого	тотального
1 (Визуальный контроль)	Засор, выявленный в результате внешнего осмотра отливок	1	1
	Горючие трещины	7	7
	Недолив выходной крошки пера лопатки	1	1
	Пригар	0	0
2 (Контроль химического состава)	Механическое повреждение модели	1	1
	Несоответствие требованиям по химическому составу сплава	0	0
3 (Контроль структуры)	Несоответствие отливки требованиям по макроструктуре и кристаллографической ориентации зёрен	40	55
4 (ЛЮМ-контроль)	Засор, выявленный по результатам проведения капиллярной дефектоскопии	37	61
5 (Контроль толщины стенок отливки)	Несоответствие требованиям по толщине стенок (выход стержня, утонение-утолщение стенок)	10	22
6 (Рентген-контроль)	Макропористость	2	37
7 (Обмер отливок)	Коробление, несоответствие размерам	1	3

Анализ данных, приведенных в табл. 15.2, свидетельствует о том, что ступенчатый контроль качества отливок, отличающийся от тотального контроля экономичностью его проведения, позволяет получать объективную оценку наличия дефектов в отливках лишь на первом и втором этапе контроля отливок, а также оценить общий уровень брака отливок. При этом результаты ступенчатого контроля по долевым оценкам дефектности литья зависят от порядка проведения его этапов.

Тотальный метод контроля более длителен и затратен, однако он позволяет получить объективную оценку дефектности отливок, как по каждому виду дефектов, так и по общей величине брака в целом.

Помимо получения достоверной информации о дефектности производимого литья, не менее важным вопросом является правильная классификация его дефектов, позволяющая определить причины образования дефектов и наметить пути предупреждения образования выявленных дефектов. В настоящее время в цехах литья по выплавляемым моделям используют несколько схем классификации дефектов отливок, из которых наиболее распространёнными являются: классификация дефектов по их внешнему виду, форме, расположению на отливке, размерам, причинам образования дефектов, по общности физико-химических явлений, в результате которых возникает дефект.

Дефекты стальных отливок. В табл. 15.3 приведена классификация дефектов, наиболее часто встречающихся как в стальных отливках, так и отливок из других типов сплавов, получаемых в КО.

- Все указанные в табл. 15.3 дефекты объединены в следующие группы:
- дефекты поверхности отливки (группа П);
- несплошности в теле отливки (группа Г);
- несоответствие отливки по геометрии (группа С);
- несоответствие отливки по структуре (группа М);
- включения в теле отливки (В);
- включения в теле отливки (М);
- включения в теле отливки (Х);
- несоответствие механических свойств сплава отливки (М);
- несоответствие химического состава сплава отливки (Х).

Таблица 15.3  
Классификация дефектов отливок, получаемых в КО, причины образования дефектов и меры по их предупреждению

Причины образования дефекта	Меры по предупреждению образования дефекта
<b>Группа П. - ДЕФЕКТЫ ПОВЕРХНОСТИ ОТЛИВОК</b>	
<p><b>П1. ГРУБАЯ ПОВЕРХНОСТЬ</b> – недопустимо высокая шероховатость поверхности отливки. (На рисунке представлены виды поверхностей стенки отливки: а – с низкой шероховатостью; б – высокой шероховатостью)</p>	

Обработать и полировать рабочую поверхность пресс-формы. Пресс-форму изготовить из более прочного и твердого материала (например, стали, алюминиевого сплава).  
Повысить температуру и давление запрессовки модельного состава в пресс-форму.  
Повысить удельную скорость запрессовки модельного состава, например, путём увеличения диаметра запрессовочного отверстия и площадей поперечных сечений запрессовочных ходов в пресс-форме.  
Повысить температуру пресс-формы.  
Обеспечить однородность модельного состава по консистенции перед его запрессовкой в пресс-форму.  
Контролировать наличие смазки на рабочих поверхностях пресс-форм, не допуская её излишков и обеспечивая равномерность её слоя на смазываемых поверхностях.  
Добавить в смазку для пресс-форм дополнительное количество растворителя.  
Сократить длительность пребывания модели в обезжиривающем растворе или заменить раствор.  
Обезжирить или обдуть сжатым воздухом поверхность модельного блока перед нанесением на него первого слоя огнеупорного покрытия.

Низкое качество поверхности модели отливки.

1	2	Продолжение табл. 15.3
Плохое смачивание модели огнеупорной суспензией.	Обезжирить поверхность модельного блока. В суспензию для первого слоя огнеупорного покрытия ввести ПАВ или увеличить его количество. Заменить ПАВ, "Омылять" поверхность модельного блока.	
Высокая вязкость модельного состава в жидком состоянии.	Использовать модельный состав с низкой вязкостью при температуре его выплывания из КО. Повысить прочность лицевого слоя КО.	
Для приготовления огнеупорной суспензии на первый слой КО использован пылевидный материал с осколочной формой зёрен или крупных фракций.	Для приготовления огнеупорной суспензии на первый слой КО использовать пылевидный огнеупорный наполнитель с округлой формой и высокой удельной поверхностью зёрен.	
Химическое взаимодействие между отдельными компонентами модельного состава и огнеупорной суспензии с образованием внутри КО налёта кремнезёма (пушка).	Соблюдать рецептуру и технологию проведения гидролиза этилсиликата. Интенсифицировать процесс сушки первого слоя КО. Использовать модельные составы не содержащие в своём составе химически активных компонентов по отношению к ЭТС (например, стеарин, мочевины и др.). Увеличить содержание связующего вещества в составе огнеупорной суспензии. Соблюдать рецептуру и технологию проведения гидролиза этилсиликата. Для приготовления огнеупорной суспензии на первый слой КО использовать пылевидный огнеупорный наполнитель с округлой формой зёрен и высокой удельной поверхностью. Заменить связующее на более прочное или изменить технологического подготовки.	
Недостаточная прочность первого слоя КО.		
<p><b>П2. ГАЗОВАЯ ШЕРОХОВАТОСТЬ</b> – мелкие, с гладкой поверхностью, полусферические углубления на поверхности отливки, в ряде случаев имеющие в донной части раковину, уходящую в тело отливки. (На рисунке обозначены: 1 – поверхность стенки отливки; 2 – газовая шероховатость)</p>		
Недостаточно хорошо прокалена форма.	Соблюдать технологию прокалывания формы.	
Нарушена технология раскисления стали.	Соблюдать технологию раскисления стали.	
<p><b>П3. СЫПЬ</b> – металлургические "наросты" размером с песчинку, с гладкой или остроугольной поверхностью, возвышающиеся над поверхностью отливки и являющиеся единым целым с отливкой. (На рисунке обозначены: 1 – поверхность стенки отливки; 2 – сыпь)</p>		
"Пробой" первого слоя огнеупорного покрытия КО обсыпчатым зернистым материалом.	Для обсыпки первого слоя огнеупорного покрытия использовать обсыпчатым зернистым материал более мелких фракций. Повысить вязкость огнеупорной суспензии, используемой для изготовления первого слоя КО. Заменить ПАВ, используемое в огнеупорной суспензии. В суспензии использовать наполнитель с округлой формой частиц. Увеличить наполненность огнеупорной суспензии пылевидным огнеупорным материалом.	

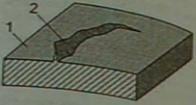
**П4. ЗАЛИВ** – дефект в виде металлического прилива или выступа в области стержневого знака.  
(На рисунке обозначены: 1 – стенка отливки; 2 – залив)



Проникновение расплава в зазор между стеной КО и знаковой частью керамического стержня.

Уменьшить величину "разазоривания" стержня. Понижить температуру заливки сплава. Понижить температуру КО.

**П5. ПРОСЕЧКА** – дефект в виде невысоких прожилков на поверхности отливки или металлического гребешка высотой от долей до нескольких миллиметров, протяжённостью от миллиметра до нескольких десятков миллиметров и толщиной в основании до 1 мм.  
(На рисунке обозначены: 1 – стенка отливки; 2 – просечка)



В модельном составе увеличить содержание воздуха или высококачественного наполнителя. Использовать модельные составы с высокой жёсткостью и прочностью.

Не использовать модели с незавершённой усадкой. Строго выдерживать состав, технологию приготовления и хранения огнеупорной суспензии. Тщательно перемешивать огнеупорную суспензию перед нанесением на модельный блок.

Компенсировать испарившуюся часть растворителя из суспензии за время её хранения. Использовать пылевидный наполнитель с округлой формой зёрен и строго регламентированной величиной удельной поверхности.

Сохранять постоянство температуры в отделении нанесения огнеупорного покрытия и при хранении модельных блоков.

Оптимизировать и строго соблюдать режим сушки огнеупорного покрытия.

Для обсыпки второго и последующих слоёв КО использовать зернистый огнеупорный материал крупной фракции. В случае использования пескосыпа с глянцевым слоем использовать обычный зернистый материал с сосредоточенным фракционным составом.

Использовать способы выплавления моделей, обеспечивающие высокую скорость нагрева блока.

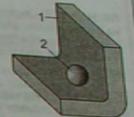
В качестве сыпучего опорного наполнителя использовать материал с низким КТЛР, либо применять крупнокубовую материал. Обеспечить равномерность уплотнения опорного наполнителя вокруг КО.

Для формовки использовать тонкостенные опоки либо выполнять по периметру опоки термокомпенсационный зазор. Уменьшить скорость нагрева КО в температурном интервале от 500°C до 700°C.

До момента выбивки отливок предохранять КО от механических повреждений на всех стадиях технологического процесса. Повысить жёсткость модельного блока путём изменения ЛПС или использования стальных каркасов. В КО выполнить разделительный (буферный) слой.

Дефект образуется в результате заполнения и кристаллизации расплава в относительно крупной трещине или трещинках, появившихся в теле КО до или во время её заливки со стороны её рабочей поверхности.

**П6. НАПЛИВ** – дефект в виде металлического шарика или группы слившихся между собой шариков с гладкой поверхностью, размером являющегося единым целым с отливкой. Как правило, данный дефект образуется во внутренних острых углах, пазах или щелевых каналах отливки.  
(На рисунке обозначены: 1 – стенка отливки; 2 – наплыв)



Перед нанесением первого слоя огнеупорного покрытия, огнеупорную суспензию выдержать для удаления из неё воздушных пузырьков.

Обеспечить условия перемешивания огнеупорной суспензии, при которых не будет происходить замешивание в неё воздуха.

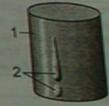
Воздушные пузырьки в огнеупорной суспензии первого слоя КО на поверхности модели.

Уменьшить количество или заменить ПАВ. Понижить вязкость огнеупорной суспензии.

При нанесении огнеупорной суспензии обеспечить полное удаление воздуха из узких "глухих" и сквозных отверстий, щелей, карманов и внутренних углов модели.

Для получения в отливках узких протяжённых полостей использовать керамические стержни либо после нанесения нескольких слоёв огнеупорного покрытия незаполненные пространство полости заполнить смесью, например, следующего состава (по массе): 65...70% молотого плавящего кварца, 2% окиси магния, остальное – ГРЭС.

**П7. КАПЛЯ** – металлическое возвышение с гладкой поверхностью в виде застывшей капли на поверхности отливки.  
(На рисунке обозначены: 1 – отливка; 2 – капля металлическая)

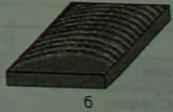
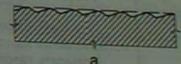


В процессе ремонта модели или монтажа модельного блока на поверхность модели попала капля жидкого модельного состава.

Аккуратно проводить ремонт модели и монтаж модельного блока. Удалить (срезать) дефект с поверхности модели.

**П8. СКЛАДЧАТОСТЬ** – гладкие чередующиеся возвышения на поверхности отливки (волнистая поверхность отливки).

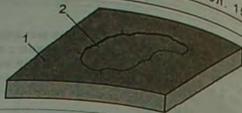
(На рисунке представлен вид разреза стенки отливки со складчатой поверхностью (а) и её вид сверху (б))



Низкая температура течения расплава в форме.

Увеличить температуру перегрева расплава при выпуске из печи, повысить начальную температуру ковша, сократить длительность выдержки расплава в ковше до заливки, повысить начальную температуру формы, увеличить сечение литниковых каналов, повысить удельную скорость заливки расплава в форму.

**П9. НАРОСТ** – выступ произвольной формы на поверхности отливки в виде оторочки с заостренными "равными" краями (На рисунке обозначены: 1 – стенка отливки; 2 – нарост).



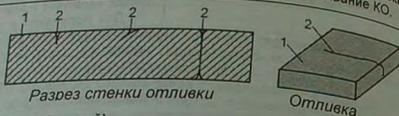
Локальное отслоение КО от поверхности отливки с образованием трещины в лицевом слое покрытия и последующим заполнением образовавшегося зазора огнеупорной суспензией второго слоя огнеупорного покрытия модельного блока.

Обеспечить условия, обеспечивающие целостность лицевого слоя огнеупорного покрытия на модельном блоке.

Локальное разрушение лицевого слоя КО.

Оптимизировать содержание связующего в огнеупорной суспензии.  
Соблюдать технологию изготовления и прокаливания КО.  
Не допускать охлаждения прокалённой КО до заливки.  
Не проводить предварительное (двойное) прокаливание КО.

**П10. СПАЙ** – дефект в виде углубления с закруглёнными краями на поверхности отливки, образованный не полностью слившимися между собой потоками металла.  
(На рисунке обозначены: 1 – стенка отливки; 2 – спай)



Нарушения в работе контрольно-измерительной аппаратуры для определения температуры жидкого металла или температуры формы (прокалочной печи).

Регулярно контролировать исправность контрольно-измерительных приборов и аппаратуры, своевременно осущест- влять их метрологическую поверку.

Низкая жидкотекучесть металла.

Повысить температуру металла при выпуске из печи. Повысить начальную температуру формы.  
Повысить температуру заливочного ковша.  
Соблюдать технологию выплавки металла.  
Оптимизировать рафинирование, дегазацию и раскисле- ние жидкого металла.  
Предохранять расплав от окисления.  
Сократить время нахождения металла в ковше.  
Использовать ковши большей металлоёмкости с футеров- кой из материалов с меньшей теплоёмкостью.

Низкая удельная скорость поступления металла в КО (форму).

Увеличить удельный расход металла из ковша при зали- вке.  
Повысить расходные характеристики ЛПС, установить до- полнительные выпоры.  
Повысить газопроницаемость КО (формы). Изменить кон- струкцию ЛПС.  
Повысить температуру и длительность прокаливания КО.

Низкая температура КО (формы).

Повысить температуру КО (формы) в момент её заливки.  
Сократить выдержку КО от выгрузки из прокалочной печи до заливки.  
Использовать формовку КО в опорный наполнитель или термостат.

Низкая газопроницаемость КО (формы).

Выполнить в КО буферный слой.  
Использовать выгорающие добавки при изготовлении КО.  
Уменьшить количество слоев в КО.  
Уменьшить количество слоев КО в местах образования спаев на отливке.  
Использовать "нитевидные" выпоры в местах образования спаев на отливке. Установить дополнительные выпоры. Для обсыпки 3-го и последующих слоев КО использовать огнеупорный материал крупных фракций.

Окисление потока металла в КО (формы) в процессе её заполне- ния.

Повысить скорость поступления расплава в КО (форму).  
Проводить заливку металла в восстановительной среде или вакууме.  
Повысить температуру заливки металла в форму.

Неправильное расположение отливки в пространстве при заливке.

Наиболее протяженные плоские или цилиндрические по- верхности отливки при проектировании ЛПС располагать в наклонном положении.

Неправильно спроектированная ЛПС.

При проектировании ЛПС отдавать предпочтение раскре- доточенному, верхнему или боковому подводу металла в от- чения стояка, коллекторов и питателей). ЛПС (увеличить се- ди и дроссели).

Прерывистая и (или) неравно- мерная заливка КО (формы).

При заливке обеспечить непрерывное и равномерное по- ступление расплава в КО.

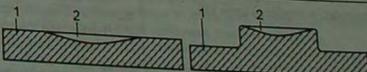
**П11. ПЛЕНА** – дефект в виде самостоятельного металлического или окисленного слоя на поверхности отливки. На поверхности отливки по внешнему виду иногда напоминает спай.  
(На рисунке обозначены: 1 – стенка отливки; 2 – плёны окис- ные)



Повышенная склонность к окис- лению отдельных элементов за- ливаемого сплава (Al, Ti, Cr и т.п.).

Заливку КО проводить в восстановительной среде, с мак- симальной скоростью, используя боковой или сифонный под- вод металла в форму.  
Предохранять сплав от окисления в процессе его выплавки и заливки в КО (форму). Использовать выплавку в вакууме и среде инертного газа.  
Для заливки использовать тщательно подготовленные ковши чайникового типа.

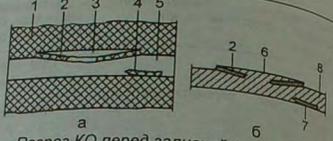
**П12. УТЯЖИНА** – углубление с гладкой поверхностью и закруглёнными краями на поверхности отливки.  
(На рисунке обозначены: 1 – разрез тела отливки; 2 – утяжи- на)



Дефект модели.

В модельный состав ввести 30–40% (по массе) твёрдого наполнителя или увеличить в модельном составе количество замешанного в него воздуха (до 20–35%, по объёму).  
Защлапывать утяжину ремонтным модельным составом, парафином, церезином и т.п.  
Соблюдать технологию изготовления моделей.  
Тщательно готовить модельный состав к запрессовке в пресс-форму.

Дефект модели.	<p>Увеличить поперечные сечения литниковых ходов в пресс-форме и/или литниковых ходов в пресс-форме</p> <p>Повысить давление запрессовки модельного состава в пресс-форму.</p> <p>Повысить температуру пресс-формы.</p> <p>Повысить технологичность отливки.</p> <p>Перед установкой в пресс-форму все отверстия и пазы в керамическом стержне зашпательвать ремонтным модельным составом, парафином и т.п.</p> <p>Перед установкой в пресс-форму пропитать стержень водой.</p>
Локальное отслоение первого от второго слоя КО.	<p>Соблюдать технологию изготовления КО.</p> <p>Изменить способ формовки и подготовки КО к заливке.</p> <p>Заменить материал опорного наполнителя на более крупнозернистый.</p>



Разрез КО перед заливкой (а) и разрез стенки отливки в месте ужимины (б)

**П13. УЖИМИНА** – локальное возвышение слоя металла (на 0,3...1,0 мм) над прилегающей к нему поверхностью стенки отливки и отделённое от поверхности стенок отливки керамическим пояском (локально или отслоившейся частью первого слоя КО), уходящим вглубь тела отливки.

(На рисунке обозначены: 1 – стенка КО перед заливкой; 2 – отслоившаяся часть первого слоя КО; 3 – полость в теле КО; 4 – отколовшийся фрагмент первого слоя КО; 5 – рабочая полость КО; 6 – ужимина; 7 – засор, вызванный отколовшимся фрагментом первого слоя КО; 8 – стенка отливки)

Не использовать в КО спаренные слои.

Соблюдать технологию приготовления огнеупорной суспензии и изготовления КО.

Оптимизировать процесс приготовления огнеупорной суспензии и изготовления КО.

Сократить время от извлечения модельного блока из суспензии до его обсыпки зернистым материалом.

Использовать более прочные связующие вещества для приготовления огнеупорной суспензии.

При формовке в опоке избегать горизонтального расположения отливок с большими плоскими поверхностями.

Для формовки использовать тонкостенные опоки, либо заполнить по периметру опоки термокомпенсационный зазор.

В качестве сыпучего опорного наполнителя использовать материал с низким КТЛР либо применять крупнозернистый материал.

Обеспечить равномерность уплотнения опорного наполнителя вокруг КО.

В КО выполнить буферный слой.

Соблюдать режим прокаливания.

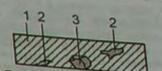
Понизить скорость нагрева КО.

Применять ЛПС, обеспечивающие спокойный рассредоточенный подвод металла в КО (форму).

Локальное разрушение первого (первого и второго) слоя КО.

**П14. ЗАСОР** – дефект, представляющий собой открытые (наружные) или закрытые (внутренние) полости в теле наполнителя, футеровки ковша, прокалочной или плавильной печи, и т.п.

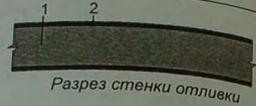
(На рисунке обозначены: 1 – тело стенки отливки; 2 – сор от сколов КО; 3 – сор от сыпучего материала КО, из футеровки печи, ковша и т.п.)



Разрез стенки отливки

Попадание в полость КО случайных частиц с моделью (модельным составом).	<p>Использовать чистый, по Н.В., модельный состав.</p> <p>Не допускать загрязнения модельного состава случайными включениями в процессе подготовки модельного состава к запрессовке в пресс-форму.</p> <p>Регенерировать и освежать модельный состав.</p>
Проникновение в полость КО случайных частиц через открытые элементы ЛПС (литниковую воронку, выпоры, открытые прибыли).	<p>Выплавление модельного состава из блоков проводить в горячей воде ЛВ вниз, либо установив блоки горизонтально среде пара, горячего воздуха, методом СВЧ или методом тер-моуда.</p> <p>Все ЛВ, открытые прибыли и выпоры КО после выплавления модельного состава заклеить бумагой, либо заткнуть самыми керамическими пробками или крышками.</p> <p>При формовке в опорный наполнитель все открытые элементы ЛПС должны быть обязательно закрыты колпачками, заклеены бумагой и т.п.</p> <p>КО в опоке размещать таким образом, чтобы верхний срез ЛВ возвышался над уровнем опорного наполнителя в опоке на 10...20 мм.</p> <p>В случае использования кварцевого песка в качестве опорного наполнителя поверхность песка по окончании формовки КО смочить раствором жидкого стекла.</p> <p>Периодически проверять состояние пространства прокалочных печей (особенно стен и свода газовых печей).</p> <p>При прокаливании литниковые воронки КО закрыть керамическими крышками либо прокаливание КО проводить ЛВ вниз.</p> <p>При заливке форм в условиях вакуума литниковую воронку КО после извлечения из печи накрыть листом тонкой фольги из алюминиевого сплава или нержавеющей стали.</p> <p>Для футеровки вакуумных печей использовать сменные тигли в охранный стакане.</p> <p>Тщательно очищать ковш и плавильную печь от случайных и отколовшихся с поверхности футеровки частиц.</p> <p>Удалить повашие частицы из стояка КО непосредственно перед заливкой путём эжектирования сжатым воздухом.</p> <p>Для получения отливок специального назначения использовать схему двойного прокаливания КО с их промывкой горячей водой через промывники.</p> <p>В конструкции стояка предусмотреть соросборник.</p> <p>В конструкции торца ЛВ предусмотреть выполнение буртика.</p>
Проникновение в полость КО случайных частиц через трещины или из трещин. Разрушение (выкрашивание) внутреннего слоя КО.	<p>Не допускать образования трещин в КО (см. П. 5).</p>

<p>Смыв керамических звусенцев КО, образовавшихся в результате проникновения огнеупорной суспензии в зазор между звеньями при их неплотном прилегании (звеньевая сборка модельного блока), либо в зазор, образованный в результате плохого припайвания и заделки мест стыка отдельных элементов модельного блока.</p> <p>Осыпаемость лицевой поверхности первого слоя КО.</p>	<p>Следить за тщательностью соединения и сплавления модели и ЛПС, выполнить галтели в местах соединений элементов модельного блока.</p> <p>В случае звеньевой сборки модельного блока на стоечке-каркасе, на торцах литниковых втулок звеньев выполнить замки или тонкие кромки, сминающиеся при соединении звеньев на стоечке-каркасе.</p> <p>Для силлиманито-корундовых КО провести их предварительное прокаливание и при комнатной температуре пропитать внутреннюю полость КО 3...7%-ным водным раствором сернистого алюминия [295].</p> <p>Увеличить содержание связующего вещества в огнеупорной суспензии для первого слоя КО.</p> <p>В огнеупорной суспензии использовать наполнитель с округлой формой частиц.</p> <p>Соблюдать технологию приготовления огнеупорной суспензии и сушки слоёв огнеупорного покрытия на модельном блоке.</p>
---	---



**П15. ПРИГАР** – дефект в виде трудноотделяемого, специфического слоя на поверхности отливки, образовавшегося вследствие физического и химического взаимодействия КО (формы) с металлоческого взаимодействия КО (формы) с металлом и его окислами.

Из числа известных типов пригара (механический, химический или термический) в литье по выплавляемым моделям встречается, как правило, пригар химико-термический.

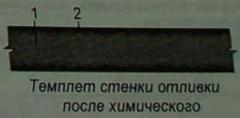
Химико-термический пригар представляет собой слёпшийся, прочно удерживаемый на поверхности отливки, первый слой КО, пропитанный продуктами высокотемпературного взаимодействия первого слоя КО, жидкого металла и газовой атмосферы, сопутствовавшей за твердеванию и охлаждению металла отливки.

(На рисунке обозначены: 1 – стенка отливки; 2 – пригар)

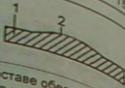
<p>Повышенная температура заливки металла в КО (форму).</p>	<p>Понизить температуру заливки.</p> <p>Повысить удельную скорость поступления расплава в КО (форму).</p> <p>Понизить температуру ковша или КО (формы).</p>
<p>Сильный локальный разогрев КО при заливке и охлаждении металла.</p>	<p>Использовать ЛПС, обеспечивающую рассредоточенный подвод металла в отливку.</p> <p>Термические узлы различных отливок, расположенных на одном стояке или коллекторе, максимально удалить друг от друга.</p>
<p>Для изготовления КО использованы материалы, не соответствующие техническим условиям.</p>	<p>Использовать материалы только после получения положительных результатов проведенного входного контроля.</p>
<p>Высокая химическая активность материала первого слоя КО по отношению к окислам, растворенным в жидком металле, либо образующимся в процессе заполнения КО расплавом, либо образующимся на поверхности контакта расплава и КО.</p>	<p>Для первого слоя огнеупорного покрытия использовать только материалы, химически инертные по отношению к применяемому сплаву.</p> <p>Заливку металла в форму проводить в восстановительной среде, в вакууме или среде инертного газа.</p> <p>Понизить температуру КО (формы) и (или) температуру заливки.</p> <p>Увеличить интенсивность теплоотвода от затвердевающей отливки.</p>



<p><b>П16. ОКИСЛЕНИЕ</b> – слой окисленного металла на всей или части поверхности отливки.</p> <p>(На рисунке обозначены: а – отливка с окисленной поверхностью; б – не окисленная отливка)</p>	<p>Ранняя выбивка заливой отливки из КО.</p> <p>Окислительная среда вокруг отливки в процессе её термобработки.</p>	<p>Выдержать отливку в КО до её полного охлаждения.</p> <p>Термическую обработку отливок проводить в нейтральной среде или вакууме.</p>
<p><b>П17. ПИТТИНГ</b> – питтинговая коррозия – разновидность высокотемпературной коррозии поверхности отливки.</p> <p>Представляет собой локальные углубления (диаметром до 1,5 мм и глубиной до 0,3 мм) с тёмной поверхностью на поверхности отливки.</p> <p>(На рисунке обозначены: 1 – поверхность отливки; 2 – питтинговая коррозия)</p>	<p>Взаимодействие составляющих стали с SiO<sub>2</sub>, КО и O<sub>2</sub> газовой атмосферы, окружающей КО.</p>	<p>Обеспечить затвердевание и охлаждение отливки в восстановительной, нейтральной среде или в вакууме.</p>
<p><b>П18. ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЕ</b> – поверхностный слой отливки толщиной до 1 мм, содержащий пониженное количество углерода по сравнению со средним содержанием углерода в металле отливки.</p> <p>(На рисунке обозначены: 1 – участок сечения стенки стальной отливки с требуемым содержанием углерода в стали; 2 – обезуглероженный слой)</p>	<p>Взаимодействие углерода сплава с кислородом воздуха в процессе охлаждения отливки.</p>	<p>Формовку КО проводить в опорный наполнитель или термостат с использованием определённого количества карбуризатора (например, древесного угля) для создания восстановительной среды в КО и вокруг неё в процессе затвердевания и охлаждения отливки.</p> <p>Сократить длительность изотермической выдержки заформованной КО при температуре прокаливания.</p> <p>Прокаливание заформованной КО проводить при температуре, обеспечивающей получение восстановительной среды вокруг КО.</p> <p>Термообработку отливок проводить в инертной или восстановительной среде.</p>
<p><b>П19. НАУГЛЕРОЖИВАНИЕ</b> – поверхностный слой отливки толщиной до 0,4 мм, содержащий повышенное количество углерода по сравнению со средним содержанием углерода в металле отливки.</p> <p>(На рисунке обозначены: 1 – участок сечения стенки стальной отливки с требуемым содержанием углерода в стали; 2 – науглероженный слой)</p>	<p>Насыщение поверхностных слоёв стальной отливки углеродом из газовой среды, окружающей КО.</p>	<p>При формовке КО в опорный наполнитель или термостат использовать строго дозированное количество карбуризатора.</p>



**П20. ВЗДУТИЕ** – локальное утолщение ("вздутие") стенки отливки с гладкой поверхностью диаметром до 7 мм и высотой до 2 мм.  
(На рисунке представлен разрез стенки отливки в месте расположения дефекта, где обозначены: 1 – стенка отливки; 2 – вздутие)



Дефект модели.

В воздушнонаполненном модельном составе обеспечить мелкодисперсность воздушных пузырьков и ограничить давление запрессовки модельного состава в пресс-форму давлением 0,15 МПа.  
При использовании модельного состава без воздуха не допускать замешивания в него воздушных пузырьков при его подготовке к запрессовке.  
Хранить модели и модельные блоки вдали от нагревательных приборов и оборудования, не допускать попадания на модель прямых солнечных лучей.

**П 21. ПОВЕРХНОСТНОЕ ПОВРЕЖДЕНИЕ** – искажение поверхности, возникшее при выбивке, очистке или транспортировке отливки.  
(На рисунке обозначены: 1 – стенка отливки; 2 – вмятина; 3 – забавина; 4 – царапина)



Вмятина – чрезмерная длительность воздействия абразивного материала в данном месте отливки при её пескоструйной или дробеструйной очистке.

Соблюдать технологию пескоструйной (дробеструйной) очистки отливок.

Вмятина – случайное механическое повреждение.

Аккуратное обращение с отливкой при зачистке её поверхности абразивным кругом, шарошкой и т.п.

Вмятина, забавина, царапина – неправильный выбор методов и инструмента для выбивки и очистки отливок от КО, отделения отливок от ЛПС.

Правильно выбирать методы и инструменты для выбивки и очистки отливок от КО, отделения от ЛПС. Аккуратно обращаться с отливками.

Вмятина, забавина, царапина – транспортировка отливок навалом.

Не проводить транспортировку отливок навалом.

**Группа У – НЕСПЛОШНОСТИ В ТЕЛЕ ОТЛИВКИ**

**У1. УСАДОЧНАЯ ПОРИСТОСТЬ И РЫХЛОТА** – скопления усачочных пор внутри тела отливки, выявляемые методами радиационной дефектоскопии.

(На рисунке представлена схема рентгенограммы отливки, где обозначены: 1 – стенка отливки; 2 – рыхлоты)



Нетехнологичная конструкция отливки.

Повысить температуру заливки металла и начальную температуру формы, рассредоточить подвод расплава в отливку, увеличить удельную скорость заливки КО, повысить технологичность отливки.  
При заливке наиболее тонкие протяжённые стенки отливки располагать наклонно.

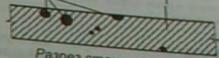
Смещение водорастворимого или постоянного стержня в пресс-форме.

Провести ревизию пресс-формы и стержневого ящика. Обеспечить условия жёсткой фиксации стержней в пресс-форме.

Высокое содержание азота и водорода, растворённого в металле.

Соблюдать технологию проведения плавки, подготовки и применения шихтовых и шлакообразующих материалов.

**У2. ШЛАКОВАЯ РАКОВИНА** – полость на поверхности или внутри тела отливки, полностью или частично заполненная шлаком.  
(На рисунке обозначены: 1 – тело стенки отливки; 2 – шлаковые включения)



Разрез стенки отливки

Попадание шлаковых частиц в КО вместе с заливаемым сплавом.

Тщательно счистить шлак перед выпуском металла из ковша. Обеспечить исправность футеровки плавильной печи и ковша. Футеровку плавильной печи и ковша изготовить из химических устойчивых, по отношению к заливаемому сплаву, огнеупорных материалов.  
Для заливки КО использовать ковш чайничного типа. В конструкции ЛПС предусмотреть ковшопуловитель.

**У3. ГАЗОВЫЕ РАКОВИНЫ** – пустоты в теле или на поверхности отливки, имеющие чистую и гладкую поверхность.  
(На рисунке обозначены: 1 – разрез стенки отливки; 2 – газовые раковины)



Повышенная газотворная способность КО.

Увеличить температуру и длительность изотермической выдержки при прокаливании КО. Не допускать в производство КО материалы, содержащие газотворные составляющие. Прокаливание КО проводить в атмосфере с избыточным содержанием кислорода.

Низкая газопроницаемость КО.

Повысить газопроницаемость КО и опорного наполнителя. Установить на отливку выпоры.

Повышенное содержание газов в жидком металле.

Дегазировать сплав. Не допускать насыщения сплава газами в процессе плавки и заливки в КО.

Неправильная конструкция ЛПС.

ЛПС конструировать таким образом, чтобы не допустить эжектирования воздуха струей металла при заполнении КО и обеспечить свободный выход газов из КО в процессе её заливки.

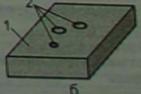
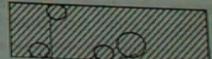
Прерывание струи металла при заливке КО.

Заливку металла в КО (форму) проводить непрерывной равномерной струей.

Неполное окисление карбида кремния – связующего керамических стержней.

Увеличить длительность прокаливания керамических стержней.  
Стержни обжигать в окислительной атмосфере.

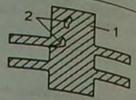
**У4. КОРОЛЕК** – обособленная капля (капли) металла в теле отливки.  
(На рисунке обозначены: 1 – стенка отливки; 2 – корольки; а – вид корольков в разрезе отливки, б – вид корольков на поверхности отливки)



Образование брызг металла в процессе заполнения формы.

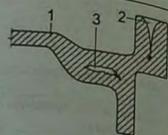
Обеспечить быстрое и спокойное заполнение КО расплавом. Повысить температуру заливки металла. Повысить температуру КО (формы). Изменить конструкцию ЛПС.

1	2
Заплеск КО (формы) в процессе заполнения металлом рядом стоящей КО (формы).	Не допускать разбрызгивания металла при заливке КО (форм). Обеспечить подачу на заливочный плац под заливку последующей КО после заливки расплавом предыдущей КО. При формовке КО в одной оплске увеличить расстояние между ними.
Низкая температура заливаемого металла и (или) низкая начальная температура КО.	Повысить температуру выпуска металла из печи, повысить температуру ковша, повысить начальную температуру КО.



**У5. ВОЗДУШНАЯ РАКОВИНА** – вытянутые полости в теле отливки со слегка окисленной и шершавой поверхностью.  
(На рисунке представлен разрез отливки 1 с газовыми раковинами 2. Расположение сечения на рисунке соответствует расположению отливки во время её заливки)

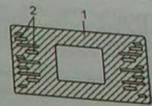
Недостаточный радиус галтелей в местах сочленения стенок отливки.	Увеличить радиус галтелей в местах сочленения стенок отливки.
Чрезмерно малое расстояние между параллельными стенками отливки.	Увеличить расстояние между параллельными стенками отливки либо для выполнения данной полости в отливке использовать керамический стержень.
Отсутствие воздействия атмосферного давления со стороны расплава в прибыли в процессе затвердевания данного теплового узла отливки.	В прибылях использовать стержни атмосферного давления. На зеркало расплава в ЛВ, по окончании заливки КО, уложить пластину пеношамотного кирпичка.



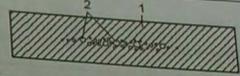
**У6. УСАДОЧНАЯ РАКОВИНА** – представляет собой открытую или закрытую полость в теле отливки с шероховатой или грубокристаллической поверхностью.  
(На рисунке обозначены: 1 – отливка; 2 – усадочная раковина открытого типа; 3 – усадочная раковина закрытого типа)

Нетехнологичная конструкция отливки.	Повысить технологичность отливки. Использовать холодильники для усиления эффекта последовательности затвердевания элементов отливки. Изменить способ формовки КО, оптимизировать параметры заливки.
Галтели имеют недостаточный радиус.	Увеличить радиус галтелей.
Неправильная конструкция ЛПС или занижены сечения питающих элементов (питателей, коллекторов, стояка).	Увеличить сечения питателей, коллекторов и стояка. Изменить конструкцию ЛПС.
Неправильно выбрано положение отливки в пространстве для заливки.	Изменить положение отливки в пространстве, разработать новую конструкцию ЛПС.
Локальный разогрев КО потоком заливаемого в неё металла.	Рассредоточить подвод металла в отливку. Понизить температуру заливки или начальную температуру формы.
Занижены размеры прибылей.	Увеличить размеры прибылей или повысить эффективность их работы.

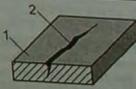
**У7. СИТОВИДНЫЕ РАКОВИНЫ** – скопление удлиненно-ориентированных тонких раковин, направленных от подложного слоя стенок отливки к её теплового центру.  
(На рисунке, где представлен поперечный разрез отливки, обозначены: 1 – отливка; 2 – ситовидные раковины)



Повышенное содержание водорода и (или) азота в стали.	Соблюдать технологию подготовки шихты и технологию ведения плавки.
<b>У8. ГАЗОВАЯ ПОРИСТОСТЬ</b> – скопление мелких пор в осевой части стенок отливки. (На рисунке, где представлен поперечный разрез отливки, обозначены: 1 – отливка; 2 – газовая пористость)	Соблюдать технологию подготовки шихты и технологию ведения плавки.
Значительное насыщение расплава водородом и (или) азотом	Соблюдать технологию подготовки шихты и технологию ведения плавки.

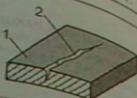


**У9. ГОРЯЧИЕ ТРЕЩИНЫ** – представляют собой поверхностные или сквозные разрывы тела отливки по границам кристаллов с извилистой формой и неровной окисленной поверхностью.  
(На рисунке обозначены: 1 – стенка отливки; 2 – горячая трещина)



Нетехнологичная конструкция отливки и (или) модельного блока.	Повысить технологичность отливки. Использовать в конструкции отливки технологические ребра. Изменить ЛПС. Изменить положение отливки в пространстве. Повысить начальную температуру КО (формы).
Высокая температура заливки.	Понизить температуру заливки. В КО выполнить буферный слой, уменьшить число слоев между буферным и литейным слоями или использовать выгорающие при прокаливании КО добавки для второго и последующих слоев.
Недостаточная податливость КО.	Не использовать монолитный опорный наполнитель. Уменьшить прочность КО или количество ее слоев.
Высокая скорость охлаждения отливки.	Повысить начальную температуру формы. Использовать формовку КО в термостат или опорный наполнитель. Непосредственно после заливки блок поместить на 1-4 ч в обогреваемый термостат с температурой (0,5-0,6) T <sub>с</sub> .
Повышенное содержание вредных примесей в металле.	В заливаемом сплаве понизить содержание вредных примесей (S, P, As, O и т.п.). Соблюдать технологию выплавки сплава. Плавку вести в вакууме или среде инертного газа.
Химический состав сплава.	Оптимизировать химический состав сплава.
Ликвация.	Оптимизировать химический состав сплава, в частности, в стали 10Х18Н11БЛ выдержать соотношение Nb C=7:1, обеспечивающее отсутствие локальных скоплений эвтектических карбидов по границам зёрен.
Структура сплава.	Оптимизировать химический состав сплава. Рафинировать сплав. При заливке в форму расплав фильтровать.
Высокое содержание Н.В. и их неблагоприятная морфология.	Оптимизировать технологию раскиснения сплава.
Высокое содержание газов в сплаве.	Соблюдать технологию плавки, подготовки и использования шлакообразующих и шихтовых материалов.

**У10. ХОЛОДНЫЕ ТРЕЩИНЫ** – представляют собой поверхностные или сквозные разрывы тела отливки с зернистым изломом и светлой (блестящей или слегка окисленной) поверхностью, иногда покрытой окисленной плёнкой с цветными побежалостями.  
(На рисунке обозначены: 1 – стенка отливки; 2 – холодная трещина)



См. п. У9.	См. п. У9. Повысить скорость охлаждения отливок в КО. Очистку отливок из крушких, в литом состоянии, слывав проводить после отжига, не используя ударные способы.
Внешние воздействия на отливку.	Соблюдать технологию проведения финишных технологических операций. Аккуратно обращаться с отливками и залитыми блоками.
Нетехнологичная конструкция отливки.	Повысить технологичность отливки: вылить галтели, напуски, технологические ребра, использовать холодедлинные.
Н.В. в теле отливки.	Повысить чистоту сплава отливки, изменить форму Н.В.

**У11. НЕСЛИТИНА** – сквозное отверстие или щель в стенке отливки с овальными краями.  
(На рисунке представлен разрез стенки отливки 1 в месте расположения неслитины 2)



См. п. П10.

См. п. П10.

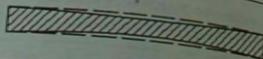
**Группа Г. НЕСООТВЕТСТВИЕ ОТЛИВОК ПО ГЕОМЕТРИИ**

**Г1. СМЕЩЕНИЕ** – относительное смещение частей отливки.  
(На рисунке представлен разрез отливки со смещением отдельных частей её стенки. Пунктирной линией обозначены требуемые контуры отливки)



Неправильно выполнена центровка пресс-формы	Выполнить центровку пресс-формы, обеспечивающую нужное позиционирование её отдельных частей.
Исключены центрирующие стержни и направляющие втулки пресс-формы.	Заменить и отрегулировать центрирующие стержни и направляющие втулки пресс-формы.
Неправильно собрана пресс-форма	Следить за правильностью сборки пресс-формы.

**Г2. УТОНЕНИЕ** – одно- или двустороннее утонение стенки отливки.  
(На рисунке представлен разрез стенки отливки, где пунктирной линией обозначены контуры требуемого профиля стенки отливки)



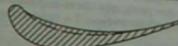
Прогиб стенки (стенки) КО под воздействием опорного наполнителя во время прокаливания.	Использовать опорный наполнитель с низким КТЛР или крупнокусковой опорный наполнитель. Использовать формовку КО в термостат. Увеличить количество слоёв КО. Заливку металла проводить в незаформованные в опорный наполнитель КО. В КО выполнить ложные ребра, а в отливке выполнить технологические ребра или технологические отверстия.
Отслоение лицевого слоя от стенки КО.	Соблюдать технологию изготовления КО.

**Г3. ПОДУТОСТЬ (тип I)** – одно или двустороннее утолщение тела отливки.  
(На рисунке представлен разрез стенки отливки, где пунктирной линией обозначены контуры требуемого профиля стенки отливки)



Высокотемпературная деформация КО.	Увеличить количество слоёв КО. Для формовки КО использовать крупнокусковой или монолитный опорный наполнитель. В стенке отливки выполнить технологические окна или ребра. Использовать ложные ребра.
------------------------------------	---

**Г4. ПОДУТОСТЬ (тип II)** – одностороннее утолщение тела отливки.  
(На рисунке представлен разрез пера турбинной лопасти, где пунктирной линией обозначены контуры требуемого профиля)



Отслоение лицевого слоя КО от вогнутой поверхности модели.	Для изготовления модели использовать модельный состав с вязкой свободной линейной усадки менее 0,6%. Для изготовления 1-го...4-го слоя КО использовать огнеупорную суспензию, приготавливаемую на водном связующем. В огнеупорной суспензии на 1-й слой КО заменить ПЛВ, увеличить её наполненность, использовать пылевидный наполнитель с округлой формой частиц.
--	--

См. п. Г3.	См. п. Г3.
<b>Г5. ПЕРЕКОС</b> – одностороннее утолщение стенки отливки. (На рисунке представлены схемы разрезов отливки, где пунктирной линией обозначены контуры их требуемых профилей)	Случайная частица (песчинка, модельный состав и т.п.) на поверхности разъёма пресс-формы или в знаковой части стержня.
Перед сборкой тщательно очищать сопрягающиеся поверхности пресс-формы.	

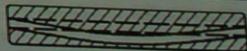


**Г6. СТЕРЖНЕВОЙ ПЕРЕКОС** – смещение расположения отверстия, канала или полости в отливке, выполняемых с помощью стержня.  
(На рисунке представлен разрез полой отливки, где пунктирной линией обозначены контуры требуемого расположения отверстия в отливке)

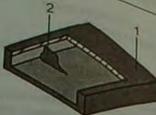


Перекос стержня.	Очистить посадочные места в пресс-форме. Уменьшить величину зазора между стержневым знаком и теплом КО. Увеличить надёжность фиксации стержня к КО. В пресс-форме выполнить постоянные жребейки.
------------------	---

**Г7. СТЕРЖНЕВАЯ РАЗНОСТЕННОСТЬ** – утолщение стенки отливки, вызванное прогибом стержня.  
(На рисунке представлено сечение отливки с утолщённо-утощёнными стенками, где пунктирной линией обозначены контуры требуемого профиля внутренней полости отливки)



Прогиб керамического стержня при запрессовке модельного состава в пресс-форму.	Повысить температуру запрессовки модельного состава в пресс-форму. В пресс-форме выполнить постоянные жребейки.
--	--

1	2
Высокотемпературная деформация керамического стержня.	Выполнить или изменить "раззазоривание" керамического стержня. Керамический стержень выполнить из материала с КТЛР меньше, чем у КО. Повысить термостойкость и высокотемпературную прочность керамического стержня. Повысить жёсткость стержня.
Г8. СТЕРЖНЕВОЙ ЗАЛИВ – металлический "гребешок" во внутренней полости отливки, выполняемой с помощью керамического стержня. (На рисунке, где часть верхней стенки отливки над заливом удалена, обозначены: 1 – тело отливки; 2 – стержневой залив)	
Трещина в керамическом стержне.	Правильно выполнить стержневые знаки и их "раззазоривание". Повысить прочность и термостойкость стержня. Соблюдать технологию изготовления керамических стержней.
Г9. НЕДОЛИВ – отсутствие металла в отдельных частях (части) отливки. (На рисунке обозначены: 1 – тело отливки; 2 – недолив)	
См. п. П10.	См. п. П10
Г10. НЕЗАЛИВ – несоответствие конфигурации отливки чертежу (неполное заполнение металлом кромок отливки). (На рисунке обозначены: 1 – тело отливки; 2 – неоформление тела отливки)	
См. п. П10.	См. п. П10.
Г11. РАЗМЕРНАЯ ТОЧНОСТЬ – недопустимые отклонения размеров отливок от номинальных. (На рисунке требуемые размеры отливки обозначены пунктирной линией)	
Дефект модели.	Контролировать размеры модели, размеры рабочих полостей пресс-формы, качество сборки пресс-формы.
Нарушение температурного режима хранения модели и модельного блока	Соблюдать температурный режим хранения модели и модельного блока.
Нарушение технологии изготовления КО.	Соблюдать технологию изготовления КО.
Изменены технологические базы при обработке отливок в механических цехах.	Соблюдать согласованные контрольные и опорные базовые поверхности отливок при их обмере и механической обработке в литейном и механических цехах.

1	2
Г12. КОРОБЛЕНИЕ – недопустимая величина деформации отливки. (На рисунке пунктирной линией обозначена требуемая форма сечения стенки отливки)	
Нетехнологичная конструкция отливки.	Изменить конструкцию отливки. Использовать в конструкции отливки технологические рёбра, стяжки и приливы, препятствующие короблению модели и отливки.
Дефект модели.	Изменить конструкцию ЛПС. Не использовать короблённые модели.
Недостаточная формоустойчивость (жёсткость) модельного состава.	Заменить модельный состав на более жёсткий. В модельных блоках использовать несущие каркасы. Использовать сборную конструкцию КО. Модели и модельные блоки хранить в положении, исключающем их деформацию под действием собственной массы. Изменить конструкцию ЛПС. В моделях отливок кольцевого типа выполнить поперечные (по диагонали) перемычки из стержней, изготовленных из модельного состава. Использовать модельный состав с величиной свободной линейной усадки менее 0,6%.
Нарушение термовременного режима охлаждения и хранения моделей и модельных блоков, технологии нанесения огнеупорного покрытия на модельные блоки и его сушки.	Увеличить длительность охлаждения моделей в пресс-форме. Обеспечить температуру в модельном отделении и отделении нанесения огнеупорного покрытия на модельные блоки в пределах от 24°C до 26°C. Модели и модельные блоки хранить при постоянной температуре в кондиционируемом помещении.
Ранняя выбивка отливок из формы.	Увеличить длительность охлаждения отливок в форме. Уменьшить скорость охлаждения отливки, например, путём повышения начальной температуры КО (формы), упаковки КО в термостат или её формовки в опорный наполнитель.
Высокая скорость охлаждения отливки в КО (форме).	Непосредственно после заливки КО поместить в термостат-накопитель отливок.
Деформация КО в процессе прокаливания и охлаждения до заливки.	Понизить скорость нагрева КО в процессе прокаливания. Использовать формовку КО в термостат или опорный наполнитель, материал которого имеет низкий КТЛР. При формовке КО в опорный наполнитель по периметру опоки выполнить термокомпенсационный зазор. В качестве опорного наполнителя использовать крупнозернистые сыпучие материалы. Для формовки в опорный наполнитель использовать тонкостенные опоки. Для изготовления КО использовать связующие вещества и огнеупорные материалы, не образующие между собой при высоких температурах легкоплавких эвтектик. Использовать для изготовления КО огнеупорные материалы с низкой величиной КТЛР. Соблюдать технологию приготовления, хранения, нанесения и сушки огнеупорного покрытия на модельные блоки. Изменить конструкцию модельного блока (ЛПС).

Продолжение табл. 15.3

1	2
Деформация КО в процессе кристаллизации и складывания металла в КО.	Понизить температуру КО до заливки. Понизить температуру заливки металла КО заформовать в опорный наполнитель или усадить в термостат. Для изготовления КО использовать связующие материалы и огнеупорные материалы, не образующие шкату собой при высоких температурах легкоплавких металлов и материалы с высокой огнеупорностью. Изменить конструкцию модельного блока.
Нарушение режима термической обработки отливки. Деформация отливки в процессе манипуляций с ней.	Соблюдать режим термической обработки (ЛТС). Не допускать воздействия значительных механических усилий на отливку.

**Г13. УХОД МЕТАЛЛА** – пустота в теле отливки, ограниченная тонкой корочкой затвердевшего металла.  
(На рисунке обозначены: 1 – отливка; 2 – дефект)



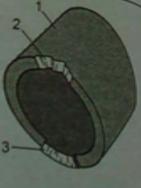
Связанная трещина в форме КО.  
Повысить прочность и термостойкость КО.  
Соблюдать технологию изготовления и просачивания заливки.  
Сократить длительность выдержки КО на воздухе до заливки.

**Г14. СМЯТИЕ** – местное локальное отклонение формы отливки от требуемой конфигурации.  
(На рисунке обозначены: 1 – отливка; 2 – торцевое смятие)



Деформация отливки.  
Для отламывания отливок от стояка на прессе использовать фильеру с оптимальным диаметром.  
Выборку отливки осуществлять при более низкой температуре.  
Не допускать падений залитого блока с большой высотой.  
Аккуратно обращаться с отливками.

**Г15. ВЫЛОМ** – углубление в теле отливки в области питателя, полученное при отламывании отливки от питателя.  
(На рисунке обозначены: 1 – отливка; 2 – вылом в месте установки одного из двух питателей отливки; 3 – остаток питателя)



Недостаточно далеко от тела отливки выполнен надрез питателя или велика глубина надреза питателя.  
Увеличить расстояние между надрезом на питателе и телом отливки, увеличить глубину надреза на питателе.

Продолжение табл. 15.3

1	2
<b>Группа X. НЕСООТВЕТСТВИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СПЛАВА ОТЛИВКИ</b>	
X1. Ошибка в данных при расчёте шихты.	Не использовать шихтовые материалы сомнительного качества без результатов их предварительного химического анализа. Провести расчёт шихты по уточнённым данным утара химических элементов.
X2. Ошибка при взвешивании шихтовых материалов.	Обеспечить правильность и точность взвешивания шихты. Провести метрологическую поверку весов, используемых для приготовления навесок шихтовых материалов. Внимательно взвешивать шихту.
X3. Нарушена или не оптимизирована технология выплавки металла.	Соблюдать технологию выплавки сплавов. Оптимизировать технологию выплавки сплава.
X4. Ошибка в расчёте шихты	Провести повторный расчёт шихты.
<b>Группа С. НЕСООТВЕТСТВИЕ СТРУКТУРЫ СПЛАВА В ОТЛИВКЕ</b>	
C1. Не выдержан или не оптимизирован химический состав сплава.	Соблюдать технологию выплавки сплава. Оптимизировать химический состав сплава. Проводить соответствующую работу по выбору и подготовке шихтовых материалов. Изменить содержание в составе шихты доли возврата собственного производства. См. п. X1–X4.
C2. Повышенное содержание газов в металле.	Предохранять сплав от насыщения газами в процессе его плавки и заливки. Сплав тщательно дегазировать.
C3. Нарушена или не оптимизирована технология выплавки металла.	Соблюдать технологию выплавки сплавов. Использовать термовременную обработку жидкого металла в совокупности с его фильтрационным рафинированием. Оптимизировать технологию выплавки сплава.
C4. Не обеспечена требуемая скорость кристаллизации и охлаждения сплава путём, например, изменения начальной температуры КО (формы), изменения способа формовки КО, изменения температуры и скорости заливки металла в КО и т.п.	Обеспечить необходимую скорость кристаллизации и охлаждения сплава путём, например, изменения начальной температуры КО (формы), изменения способа формовки КО, изменения температуры и скорости заливки металла в КО и т.п.
C5. Неправильный выбор режима термической обработки отливки.	Оптимизировать режим термической обработки отливок на основании данных анализа химического состава, результатов металлографических исследований и результатов определения механических свойств.
C6. Не соблюден режим термической обработки.	Обеспечить соблюдение режима термической обработки отливок.
<b>Группа М. НЕСООТВЕТСТВИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА</b>	
M1. Несоответствие сплава по химическому составу.	Не использовать шихтовые материалы сомнительного качества без их предварительного химического анализа. Провести расчёт шихты по уточнённым данным утара химических элементов. В конце плавки сплава проводить экспресс-анализ химического состава сплава.
M2. Повышенное содержание газов в металле.	Предохранять сплав от насыщения газами в процессе его плавки и заливки. Сплав тщательно дегазировать и раскислить.
M3. Повышенное содержание Н.В. в сплаве.	Предохранять сплав от насыщения газами в процессе его плавки и заливки. Сплав тщательно дегазировать, раскислить и рафинировать.

1	2
	Оптимизировать процесс модифицирования сплава. Подобрать эффективные модификаторы сплава.
M4 Низкая эффективность модифицирования сплава.	Провести выбор режима термической обработки отливок на основании данных анализа химического состава, результатов металлографических исследований и результатов определения механических свойств.
M5 Неправильный выбор режима термической обработки отливок.	Обеспечить соблюдение режима термической обработки отливок.
M6 Нарушен режим термической обработки отливок.	

**Металлургические дефекты чугунов отливок.** Из числа сплавов на основе железа наиболее заметно влияние металлургических дефектов на свойства металла в отливках проявляется в чугуне, в частности, в чугуне высокопрочном с шаровидным графитом. Виды наиболее часто встречающихся металлургических дефектов и меры по их предупреждению в отливках из высокопрочного чугуна приведены в табл. 15.4.

**Металлургические дефекты в отливках из ВЧ** Таблица 15.4

Вид дефекта	Меры по предупреждению образования дефекта
Вермикулярный графит в структуре ВЧ.	Повысить содержание в чугуне Mg и/или PЗМ. Использовать шихтовые материалы с низким содержанием серы и титана. Сократить время между операцией модифицирования и заливкой форм.
Образование шаровидного графита крупных размеров.	Сократить время между операцией модифицирования и заливкой форм. Не перегревать расплава. Не допускать использования избыточного количества Mg.
Щелочное расположение шаровидного графита в структуре чугуна.	Повысить углеродный эквивалент чугуна.
Пластинчатый графит в структуре ВЧ.	Использовать шихтовые материалы с низким содержанием Pb, Bi, Sb. Увеличить количество используемого PЗМ.
Пластинчатый графит в структуре поверхностных слоев отливок из ВЧ.	Повысить содержание магния и понизить содержание серы. Понизить температуру заливки чугуна. Повысить удельную скорость заливки форм.
Отбел по границам звтектических ячеек.	Повысить углеродный эквивалент и/или содержание кремния в чугуне. Понизить содержание Mg и/или PЗМ, Mn, Cr, Mo, V и т.п. Повысить температуру заливки и начальную температуру КО.
Низкое соотношение структурных составляющих феррит/перлит.	Повысить содержание кремния, уменьшить содержание элементов, стабилизирующих перлит. Осуществлять заливку КО в горячем опорном наполнителе.
Сегрегация карбидов.	Понизить содержание в чугуне карбидообразующих элементов.
Усадочная пористость.	Повысить содержание углерода до 3,8%. Понизить количество вводимого магния и легирующих элементов. Сократить время между операцией модифицирования и заливкой форм.
Пористость водородная.	Использовать чистые и сухие шихтовые материалы, модификаторы. В чугуне понизить содержание алюминия и титана.

**Дефекты отливок из жаропрочных никелевых сплавов.** Качеству поверхности отливок особо ответственного и специального назначения, уделяют особое внимание, поскольку качество поверхности литой детали, в этом случае, во многом превалирует над надежностью и долговечностью. В свою очередь, повышенные требования к качеству отливок из жаропрочных никелевых сплавов приводят к достаточно высокому браку литья. В частности, достаточно большую долю отливок из жаропрочных никелевых сплавов, в том числе и турбинных лопаток, отбраковывают из-за наличия на их поверхности Н.В. и других дефектов, источником появления которых являются [219]:

- Н.В. из возврата шихты;
- окисные плёны, образующиеся в процессе плавки сплава;
- частицы разрушенного лицевого слоя КО, появляющиеся при её прокаливании и заливке;
- продукты химического взаимодействия химически активных компонентов сплава с компонентами лицевого слоя КО (питтинговая коррозия, пригар и т.п.);
- относительно рыхлая поверхность лицевого слоя, приводящая к его осыпанию.

К числу причин появления поверхностных дефектов на отливках из жаропрочных никелевых сплавов следует также отнести низкое качество используемых мерных шихтовых заготовок, случайные частицы, попавшие в полость КО из тигля печи (при повороте печи для заливки), свода или пода прокалочной печи, цеховой пыли, частицы, не удалённые из модельного состава вторичного использования в процессе его регенерации и т.п., а также азот, растворённый в сплаве и образующий с химически активными компонентами сплава карбиды и карбонитриды.

Нежелательным явлением, понижающим чистоту поверхности отливок, является пригар, периодически появляющийся на отливках из жаропрочных сплавов, как правило, заливаемых на воздухе. С целью предупреждения образования пригара на отливках из жаропрочных никелевых сплавов, заливаемых в КО на воздухе, авторы работы [282] 5-й слой КО выполняли из эмалевого фритты ЭВТ-24. При прокаливании КО фритта расплавляется и становится газонепроницаемым барьером в теле КО, что предупреждает образование пригара на поверхности отливок.

Во избежание образования пригара на отливках, заливку КО рекомендуется проводить в условиях восстановительной или нейтральной среды, в вакууме, при этом понизив температуру заливаемого сплава и начальную температуру КО.

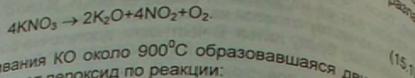
Как и у отливок из высоколегированных хромоникелевых и марганцовистых сталей, поверхность отливок из жаропрочных никелевых сплавов может быть повреждена питтинговой коррозией (язвенной коррозией, сыпью), выявляемой как визуально, так и методами ЛЮМ-контроля.

Питтинговая коррозия – результат взаимодействия отдельных элементов сплава с веществами, присутствующими в лицевом слое КО. По мнению [99], причиной образования питтинговой коррозии на отливках из жаропрочных никелевых сплавов является наличие значительного количества окислов щелочных металлов в лицевом слое КО.

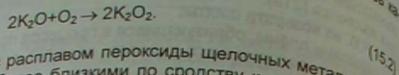
Натрий и калий в сплав отливки, в основном, поступают из КО, если КО была изготовлена по модели, содержащей в своём составе щелочные металлы. К числу таких модельных составов, например, относятся воскообразные модельные составы, содержащие в качестве твёрдого наполнителя мочевины, где, в свою очередь, присутствует определённое количество  $KNO_3$ .

Недостаточно полное удаление такого модельного состава из КО при выплавке приводит к насыщению внутренних слоёв КО калий- и натрийсодержащими

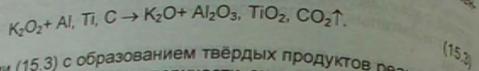
веществами. В процессе прокаливания KO происходит разложение этих веществ. Например, калиевая селитра, оставшаяся в порах и на внутренней поверхности KO при нагреве, в процессе прокаливания KO, плавится при 334°C и при 400°C разлагается по реакции:



При температуре прокаливания KO около 900°C образовавшаяся двуокись калия с кислородом воздуха образует пероксид по реакции:



Вследствие при контакте с расплавом пероксиды щелочных металлов легко восстанавливаются до оксидов, более близких по родству к кислороду элементов, содержащимся в расплаве (Al, Ti, C и др.):



Прохождение реакции (15.3) с образованием твёрдых продуктов реакции ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  и др.) приводит к образованию на поверхности охлаждающейся отливки дефектов в виде язвенной (питтинговой) коррозии. В случае прохождения данной реакции на границе расплава в работе [99], свидетельствуют о том, что при температуре KO 950°C, увеличение содержания в KO окислов щелочных металлов с 0,2 до 1,0% увеличило число поверхностных дефектов на отливке с 2-х до 40 штук на 1  $\text{дм}^2$  её поверхности. В то же время повышение температуры прокаливания KO до 1100°C полностью устраняет негативное влияние окислов щелочных металлов на качество поверхности отливок, что, по-видимому, связано с их химическим взаимодействием с материалом KO и переходом в соединения типа натриевых и калиевых стекол. Если в реакцию (15.3) вступает углерод, растворённый в расплаве, то на поверхности затвердевающей отливки, по мнению авторов [99], образуются поверхностные газоусадочные дефекты микроскопических размеров, поскольку продуктом реакции в данном случае является окись углерода.

С целью уменьшения химического взаимодействия сплава отливки и материала лицевого слоя KO авторы работы [219] понижают содержание кремнезёма в ГРЭС до 10...12%, а используемые зернистые огнеупорные материалы, для удаления из них окислов железа и кальция, предварительно обрабатывают соляной кислотой и обжигают в вакууме.

С этой же целью при изготовлении KO, заливаемых в проходных вакуумных печах направленной кристаллизации отливок (типа ПМП), дистен-силлиманитовый наполнитель огнеупорной суспензии подвергают предварительной муллитизации с добавлением глинозёма, а низкокремнистое этилсиликатное связующее модифицируют нитратом алюминия для низкотемпературного связывания кремнезёма в муллит в процессе прокаливания KO.

В направленно-закристаллизованных отливках из жаропрочных никелевых сплавов, как и в отливках с равноосной макроструктурой, возникают достаточно высокие литейные напряжения, причинами которых являются:

- низкая податливость KO;
- несоответствие КТЛР материалов KO, керамического стержня и сплава отливки;
- затруднённая усадка отливки;
- особенности конструкции и габаритные размеры отливки;

- межфазные напряжения в структуре сплава, вызванные высокой скоростью охлаждения отливки.

Образующиеся напряжения могут привести к образованию в отливках трещин, напряжений могут растрескиваться даже монокристаллические отливки при их длительном хранении с неудалёнными из них керамическими стержнями после травления отливок на макроструктуру. При этом трещины в монокристаллических отливках развиваются, в основном, по плоскостям [001] во взаимно перпендикулярных направлениях.

В случае образования трещин по границам зёрен в отливках необходимо повысить податливость KO, сократить длительность хранения KO до заливки, дополнительно легировать сплав элементами, упрочняющими границы зёрен, понизить сопротивление гафния в сплаве, понизить скорость охлаждения отливки, например, путём её термостатирования по окончании кристаллизации металла.

В процессе направленной кристаллизации в отливке формируется монокристаллическая или направленно-столбчатая макроструктура, характеризующаяся определённым дендритно-ячеистым строением и определённой степенью внутридендритной и междендритной ликвиации химических элементов, входящих в состав сплава отливки. В направленно-закристаллизованных отливках с обогащением междендритного пространства химическими элементами низкой плотности (Al, Ti и др.) связано образование зональной ликвиационной полосчатости и поверхностных карбидов типа  $\text{Me}_6\text{C}$  (на основе  $\text{Ni}_3\text{W}_2\text{C}$ ) [191].

Процесс образования зональной ликвиационной полосчатости и поверхностных карбидов типа  $\text{Me}_6\text{C}$  связан с размерами междендритных каналов (пространства). При этом чем меньше размеры междендритного пространства, тем ниже вероятность образования зональной ликвиационной полосчатости, поверхностных карбидов типа  $\text{Me}_6\text{C}$ , междендритной усадочной пористости, которая нередко "выходит" на поверхность отливок и обнаруживается ЛЮМ-контролем.

По данным [48], расстояние между дендритными осями первого и второго порядка ( $\lambda$ ) можно рассчитать по уравнению:

$$\lambda = \frac{a}{(\nu \cdot G)^n} \quad (15.4)$$

где  $a$  – коэффициент, пропорциональный температурному интервалу кристаллизации сплава;  $\nu$  – скорость перемещения фронта кристаллизации;  $G$  – градиент температуры двухфазной области кристаллизации отливки;  $n$  – показатель степени.

Из уравнения (15.4) следует, что протяжённость междендритного канала прямо пропорциональна интервалу кристаллизации сплава и обратно пропорциональна величинам  $\nu$  и  $G$ . Исходя из вышеизложенного, можно констатировать, что с увеличением скорости затвердевания отливки, уменьшаются размеры междендритного пространства и, следовательно, понижается вероятность образования вышеуказанных структурных дефектов.

Практика получения литья из жаропрочных никелевых сплавов свидетельствует о том, что в большей степени карбиды и междендритная пористость образуются в отливках с равноосной макроструктурой. В направленно-закристаллизованных отливках размеры и количество карбидов, а также величина междендритной пористости значительно меньше. Однако в таких отливках появляется зональная ликвиационная полосчатость. В то же время отливки, полученные в условиях высокоскоростной направленной кристаллизации, не имеют вышеуказанных структурных де-

фектов, а величина междендритной усадочной пористости (микрорпористости) минимальна.

В монокристаллических отливках наиболее часто встречаются дезориентационные зоны, к числу которых относятся равновесные зерна, струйная полосчатость, "паразитные" кристаллы и др. Для предупреждения образования данных дефектов, прежде всего, в процессе кристаллизации отливки следует обратить внимание на поперечного градиента температур на границе металл-КО и в жидкой фазе, перед фронтом кристаллизации;

- абсолютную величину продольного и поперечного градиентов температур (степень искривления поверхности изоликовидуса);
- соотношение продольного и поперечного градиентов температур (степень искривления поверхности изоликовидуса).

Для предупреждения рекристаллизации в монокристаллических отливках необходимо замедлить скорость их охлаждения, уменьшить силу динамического удара песчинок об отливку во время абразивоструйной очистки её поверхности (уменьшить давление или расход воздуха в пескоструйной установке), после термической обработки отливок предусмотреть выполнение доводочных операций, например шлифовки.

Как было отмечено выше, к числу специфических дефектов направленно-закристаллизованных отливок относятся: струйная ликвация, поверхностные карбиды, "паразитные" зёрна (кристаллы), рекристаллизованные зёрна. Помимо этого, в монокристаллических отливках могут быть структурные дефекты (называемые высокоугловыми границами зёрен или сокращённым английским названием — Н.В.), допустимые структурные несовершенства (малоугловые границы или субграницы) и "прострел".

Струйная ликвация — это дефект, представляющий собой цепочку дезориентированных равноосных зёрен, расположенных, как правило, вдоль границ ориентированных зёрен отливки или между дендритами. Длина такой цепочки может быть различной, а ширина, как правило, не превышает 2 мм.

Причиной образования струйной ликвации, в основном, является низкий градиент температуры на фронте кристаллизации сплава. То есть появление струйной ликвации способствуют все факторы, увеличивающие абсолютную протяжённость двухфазной области кристаллизующейся отливки. Помимо этого, струйную ликвацию вызывает недостаточно высокая гомогенизация расплава. Для качественной гомогенизации расплава, непосредственно перед заливкой в КО, следует подвергнуть ТВО.

Рекристаллизованные зёрна являются следствием высокого уровня остаточных напряжений в отливке после её охлаждения или механической обработки. Как правило, данный дефект появляется после высокотемпературного нагрева литых деталей.

Малоугловые границы (субграницы) являются допустимыми, но нежелательными дефектами структуры отливки, поскольку, например, в безуглеродистых жаропрочных сплавах с высоким содержанием рения наличие субграниц не позволяет достичь предельных показателей жаропрочности. Причиной образования субграниц является низкая скорость кристаллизации сплава, низкий градиент температур на фронте кристаллизации, наличие керамического стержня в отливке и др.

"Паразитные" зёрна представляют собой крупные зёрна, имеющие произвольную ориентацию в отливке. Зарождаются "паразитные" зёрна на стенках КО, керамическом стержне или на Н.В. в расплаве. Для предупреждения образования данного дефекта необходимо при кристаллизации отливки обеспечить высокие значе-

ния градиента температур на фронте кристаллизации, высокую скорость кристаллизации, низкую смачиваемость расплавом стенок КО и стержня, повысить температуру заливки сплава в форму.

"Прострел" — специфический дефект отливок, представляющий собой длинные узкие зёрна, глубиной залегания в теле отливки в десятки микрон, проходящие вдоль всей отливки в направлении наибольшего градиента температур, созданного при кристаллизации отливки. Основными причинами возникновения данного дефекта являются наличие дефектов в самой затравке стартового конуса или наличие примесных включений в лицевом слое КО, явившихся активными центрами зарождения кристаллов.

Анализ видов дефектов отливок с направленно-столбчатой структурой, полученных в условиях высокоскоростной направленной кристаллизации на отечественных предприятиях в установках УВНК-8П, показывает, что уровень бракованных отливок достигает 30...50% от числа залитых, при выходе годного 0,5...0,85. При этом основными видами брака являются несоответствие структуры и засор. В табл. 15.5 приведены усреднённые данные значений величин брака от общей величины отбракованных отливок, полученных в установках УВНК-8П, с направленно-столбчатой структурой из жаропрочных никелевых сплавов.

Таблица 15.5  
Доля видов брака в общем объёме отбракованных направленно-закристаллизованных отливок из жаропрочных никелевых сплавов

Вид брака	Величина вида брака в общем количестве забракованных отливок, %
Несоответствие структуры	30–50
Засор (обобщённое название всех дефектов поверхности отливки, выявленных невооружённым глазом, в том числе и ЛЮМ-контролем)	30–40
Недопустимое коробление стержня (в том числе и его разрушение с выходом на поверхность отливки)	5–25
Горячие трещины	5–10
Залив (проникновение металла отливки в трещину, образовавшуюся в керамическом стержне)	До 5
Усадочная пористость, недолив, пригар, коробление, механическое повреждение модели, механическое повреждение отливки, усадочная раковина	До 2 (каждого)

**Дефекты отливок, получаемых центробежным способом заливки с горизонтальной осью вращения формы.** Центробежный способ с горизонтальной осью вращения в литье по выплавляемым моделям относится к числу наименее распространённых способов получения отливок.

Тем не менее, в ряде случаев данный способ весьма эффективен и позволяет получать высококачественные как крупные отливки цилиндрической формы, так и средние, и мелкие фасонные отливки. Данным способом преимущественно изготавливают отливки из сталей и медных сплавов.

Перечень наиболее распространённых дефектов отливок цилиндрической формы из сталей и медных сплавов, получаемых центробежным способом с горизонтальной осью вращения, причины их образования и меры по предупреждению образования дефектов приведены в табл. 15.6.

Дефекты отливок, полученных центробежным способом с горизонтальной осью вращения, причины их образования и меры по предупреждению образования дефектов

Дефект	Причины образования	Меры по предупреждению образования дефекта
Усадочные раковины.	Низкая скорость кристаллизации.	Увеличить интенсивность охлаждения отливки. Увеличить частоту вращения формы.
Газовые раковины.	Повышенное содержание растворенных газов в расплаве.	Понизить содержание газов в расплаве. Понизить теплоаккумулирующую способность КО. Повысить температуру КО.
Продольные трещины.	Затвердевание и охлаждение отливки проводится при большом коэффициенте утяжеления (слишком большое давление на металл отливки).	Уменьшить скорость заливки. Понизить частоту вращения формы. Понизить содержание Н.В. в металле. Повысить трещиностойкость сплава.
Поперечные трещины.	Затруднена продольная усадка отливки.	Исключить затрудненную усадку. Использовать орнаментирование внешней поверхности отливки.
Спаи, корольки.	Разбрызгивание расплава во время заливки при низкой частоте вращения формы. Недостаточный перегрев расплава при заливке. Прерывание струи при заливке.	Повысить частоту вращения формы талла и формы. Заливку формы проводить плавной и равномерной подачей расплава.
Ликвация.	Повышенная вибрация центробежной машины. Высокая частота вращения формы. Большая толщина стенок отливки.	Уменьшить частоту вращения формы. Уменьшить припуски на механическую обработку. Повысить чистоту расплава от нежелательных химических элементов и Н.В.
Пригар.	Высокая температура КО и давление расплава на стенки КО.	Понизить температуру формы. Понизить частоту вращения формы и скорость заливки. Повысить наполненность огнеупорной суспензии ПМ, используемой для выполнения первого слоя КО.

Дефекты отливок из титановых сплавов, получаемых центробежным способом с вертикальной осью вращения формы, при заливке в ГО. Высокая химическая активность титана является основной причиной насыщения поверхности отливок углеродом. Это обстоятельство приводит к изменению не только химического состава поверхности титановых отливок, но и изменению его структуры и механических свойств. Помимо углерода, поверхность отливок из титановых сплавов также насыщается газами, выделяющимися из формы.

Наиболее заметное влияние на изменение свойств поверхностного слоя титановых отливок оказывает кислород. Превышение предела растворимости по кислороду и углероду в титановом сплаве приводит к выделению в поверхностном слое отливок оксидов и карбидов, и, как следствие, приводит к повышению твердости поверхностного слоя отливки и образованию в нём микротрещин.

Сильный перегрев поверхности ГО в период отвода теплоты перегрева от расплава может привести к образованию пригара на отливках. Этому процессу наиболее подвержены тепловые узлы отливки и её внутренние поверхности, оформленные графитовым стержнем, а также места подвода расплава в отливку.

Для отливок из титановых сплавов характерным дефектом является газовая пористость. Причиной образования газовых дефектов является газы выделение из ГО или взаимодействие расплава с её поверхностью. Газовым дефектам наиболее

подвержены отливки, получаемые в "холодные формы", а также в формы, загрязнённые цеховой пылью (окислами кремния, алюминия, железа и др.), или в КО с пористости в отливках целесообразно повысить температуру образования газовой определённого предела, понизить давление в плавильно-заливочной камере, изменить ориентацию отливки относительно оси вращения формы, отдавая предпочтение расположению тонких протяжённых стенок отливки в одной плоскости с осью вращения формы.

Трещины в отливках из титановых сплавов — явление частое и связано, с одной стороны, с изменением свойств поверхностного слоя отливки в результате химического взаимодействия титана и формы, с другой стороны, с образующимися термическими напряжениями в затвердевающей отливке. При этом отливки, полученные в ГО, имеют значительно большие внутренние напряжения, чем отливки, полученные в ГО.

В табл. 15.7 приведены наиболее распространённые виды дефектов титановых отливок, причины их образования и меры по предупреждению образования дефектов.

Наиболее распространённые виды дефектов титановых отливок, полученных центробежной заливкой в оболочковые графитовые формы, причины образования дефектов и меры по предупреждению образования дефектов

Причины образования дефекта	Меры по предупреждению образования дефектов
1	2
<b>1. Несответствие размеров отливки</b>	
Некачественное изготовление пресс-формы или её износ.	Правильно учитывать усадку модельного состава, ГО и сплава при проектировании рабочих полостей пресс-формы. Периодически контролировать степень износа поверхностей и направляющих элементов пресс-формы. Своевременно проводить ремонт пресс-формы.
Нарушение технологии изготовления ГО.	Соблюдать технологию изготовления ГО.
Использование некондиционных материалов для изготовления ГО.	Осуществлять входной контроль используемых материалов.
Нарушение технологии изготовления моделей и модельных блоков.	Соблюдать технологию изготовления моделей и модельных блоков. Соблюдать температурный режим хранения моделей и модельных блоков (см. табл. 15.1).
<b>2. Недолив</b>	
Низкий перегрев жидкого металла.	Соблюдать режим плавки.
Недостаток жидкого металла в форме.	Использовать рациональные ЛПС и оптимальный режим заливки. Понизить интенсивность охлаждения тигля пени.
Низкая скорость течения расплава в форме.	Увеличить площадь сечения каналов литниковой системы. Увеличить частоту вращения формы. Увеличить расход расплава из тигля пени.
Не рациональная ориентация отливок в контейнере.	Изменить ориентацию отливок в пространстве.
<b>3. Поверхностные усадочные дефекты (утяжины)</b>	
Недостаточное питание термических узлов отливки.	Обеспечить необходимые условия затвердевания и питания отливки.
<b>4. Нечёткие контуры отливки (незалив)</b>	
Низкая жидкотекучесть сплава.	Соблюдать режим плавки. Повысить перегрев расплава. Увеличить частоту вращения формы.

1	2
<b>5. Повышенная шероховатость поверхности отливки</b>	
Нарушение технологии изготовления первого слоя ГО	Соблюдать технологию изготовления первого слоя ГО.
Нарушение технологии изготовления первого слоя ГО при пересосе слоя ГО	Соблюдать режим тепловой обработки ГО.
Подгорание (окисление) ГО при прокатывании	Контролировать состав суспензии. Соблюдать технологию приготовления суспензии.
Недостаточное содержание графитового порошка в суспензии	Использовать материал требуемой фракции.
Использование графитового порошка крупных фракций	Осуществлять систематический ремонт и контроль пресс-форм.
Использована модель с дефектной поверхностью.	Аккуратно обращаться с моделями.
	Повысить чистоту поверхности моделей путем оптимизации термовременных параметров ее изготовления.
	Строго следить за содержанием воздуха в модельном составе.
Разбрызгивание металла в процессе заполнения формы.	Для изготовления моделей отливок не использовать состав модельного состава.
	Использовать рациональные литниковые системы и оптимальный режим заполнения форм.
<b>6. Пригар</b>	
Локальный перегрев формы при ее заливке	Использовать рациональные ЛПС и оптимальный режим заливки формы.
Повышенное давление расплава на стенке формы	Увеличить плотность материала ГО, понизить частоту вращения формы.
Низкая плотность ГО при подгорании (окисление) ГО при прокатывании	Увеличить наполненность огнеупорной суспензии ПМ.
<b>7. Повышенная твердость поверхности слоя отливки (α-слой)</b>	
Повышенное натекание воздуха в печи во время плавки	Устранить причину недопустимого уровня натекания воздуха в печи.
Низкий вакуум в печи	Обеспечить требуемую величину вакуума
Преждевременное открывание печи по окончании заливки формы	Выдержать залитые формы под вакуумом для охлаждения отливок до 250 - 300°С.
Физико-химическое взаимодействие на границе металл-форма.	Понизить температуру расплава. Соблюдать режим прокатывания и хранения ГО.
<b>8. Забоины, заусенцы</b>	
Механические повреждения отливок при выбивке, правке, отделке и транспортировке.	Аккуратно обращаться с отливками на всех этапах их обработки и транспортировки.
<b>9. Раздутие формы</b>	
Использованы материалы несоответствующей зернистости.	Использовать материалы требуемой зернистости. Уменьшить частоту вращения формы.
	Увеличить плотность укладки засыпчных шаров в контейнер вокруг ГО.
<b>10. Засор</b>	
Разрушение ГО струей заливаемого расплава.	Повысить прочность ГО.
Неправильная конструкция ЛПС.	Изменить конструкцию ЛПС и режим плавки.
Неудовлетворительная очистка ГО при сборке формы.	Провести продувку и эжектирование внутренней полости формы.
Повышенная сыпаваемость ГО.	Соблюдать технологию изготовления ГО и режима ее тепловой обработки.
<b>11. Газовые раковины</b>	
Неудовлетворительные условия заполнения формы расплавом.	Изменить расположение отливки в контейнере (в пространстве) относительно оси вращения формы.
Металл содержит повышенное содержание газов.	Для плавки использовать расходные электроды первого переплава без α-слоя на поверхности.
Повышенное натекание воздуха в печи в процессе плавки.	Устранить причину недопустимого уровня натекания воздуха в печи.

1	2
<b>12. Разрушение графитовой оболочковой формы (уход металла)</b>	
Недостаточное давление расплава в форме.	Увеличить расстояние между отливкой и осью вращения формы или (и) увеличить частоту вращения формы при заливке.
Низкая прочность ГО.	Увеличить плотность (прочность) ГО
	Соблюдать технологию изготовления и прокатывания ГО. Аккуратно обращаться с ГО на всех этапах ее производства и использования.
<b>13. Спай, корольки, расхождение металла отливки</b>	
Нарушение сплошности потока расплава в процессе заполнения формы.	Использовать рациональные ЛПС и оптимальный режим заливки форм. Заливку проводить при пониженном коэффициенте "утяжеления".
Заплески и разбрызгивание расплава в полости формы.	Правильно расположить форму под заливку.
Пульсация расплава в процессе заливки.	Обеспечить равенство расходных характеристик в различных элементах литниковой системы.
Заполнение рабочей полости ГО несколькими потоками расплава.	Изменить ориентацию отливки в контейнере.
Низкий перегрев расплава при заливке.	Соблюдать электрические параметры плавки.
Повышенная теплоаккумулирующая способность ГО.	Понизить плотность материала ГО. Уменьшить толщину ГО с одновременным повышением ее прочности.
<b>14. Трещины, коробление отливок</b>	
Недостаточная податливость графитового стержня.	Изменить схему подвода расплава в отливку. Использовать оболочковые стержни.
Некачественная заварка дефектов отливки.	Понизить плотность материала стержня. Понизить температуру заливки расплава в форму.
Повышенная твердость поверхностного слоя отливки (α-слой).	Соблюдать технологию разделки и заварки дефектов отливки.
В отливках имеются острые углы и галтели малого радиуса.	Обеспечить условия, предупреждающие образование α-слоя на поверхности отливок.
<b>15. Усадочные раковины</b>	
Недостаточное питание термических узлов отливки.	Изменить ЛПС и режим заливки формы. Повысить технологичность отливки.
Нетехнологичная конструкция литой детали.	В конструкции отливки использовать уклоны и напуски. Повысить технологичность литой заготовки. Изменить ЛПС и оптимизировать режим заливки формы.
<b>16. Усадочная пористость</b>	
Низкий вакуум в печи, в процессе плавки.	Обеспечить требуемую величину вакуума в печи во время плавки.
Повышенное натекание воздуха в печь.	Устранить причины недопустимо высокого уровня натекания воздуха в печь.
Взаимодействие расплава с адсорбированными газами на границе металл-форма.	Форму предварительно нагреть до 400°С.
Недостаточно высокая химическая стойкость (инертность) материала ГО.	Использовать ЛПС и режимы заливки, обеспечивающие требуемое давление расплава в форме.
Несоблюдение принципа последовательности затвердевания отливки.	Оптимизировать конструкцию ЛПС, выполнить уклоны и напуски на отливке.
Высокое содержание газов в расплаве.	Использовать расходные электроды первого переплава без α-слоя на поверхности
В полости формы присутствуют частицы инородного материала (цеховая пыль, влага и т.п.)	Обеспечить надлежащие условия хранения исходных (формовочных) материалов, ГО и их контроль.