

20. ЖИДКОТЕКУЧЕСТЬ МЕТАЛЛА И ЗАПОЛНЯЕМОСТЬ ФОРМ

Литейное свойство жидкого металла, характеризующее его способность заполнять форму, называют жидкотекучестью.

Если расплав обладает низкой жидкотекучестью, то при заполнении формы для тонкостенных крупногабаритных отливок движение металла прекратится раньше, чем она будет заполнена. Полученный дефект называется недоливом и не может быть исправлен.

Если при заполнении формы металлом с низкой жидкотекучестью образуются встречные потоки, поступающие из различных литников или частей формы, они могут не слиться. В этом случае в отливке нарушается сплошность, возникает «неслитина», при небольшом размере этот дефект может быть вырублен до чистого металла и заварен.

Определение жидкотекучести происходит на технологических пробах, представляющих собой модель плохо заполняющейся отливки. Такие формы имеют длинный измерительный канал малого сечения. Жидкотекучесть измеряется длиной заполненной части канала. Существуют следующие методы ее определения.

1. Пробы с горизонтальными прямоугольными измерительными каналами (рис. 6.24, *а*).

Они имеют обычно цилиндрический канал диаметром 5 мм, выполняемый в песчано-глинистой форме. Металл поступает в канал из буферного резервуара, заполняемого из литниковой воронки. Проба должна быть установлена строго горизонтально. Воспроизводимость определения жидкотекучести на такой пробе низкая (от 2 до 15 %).

Проба с вертикальным прямоугольным измерительным каналом или U-проба (6.24, *б*). Предложена Ю. А. Нехендзи и А. А. Самариним в 1946 г., а усовершенствована и превращена в комплексную пробу для определения литейных свойств И. В. Купцовым в 1966 г. Состоит она из литниковой воронки, от дна которой отходит U-образный канал. Проба оформляется в металлической форме с вертикальным разрезом. Одновременно с измерением жидкотекучести на ней можно определить линейную усадку, склонность к трещинам и развитие усадочных пустот в сплаве. Кроме того, после разрезки пробы на ее кусках можно выявлять структуру, определять содержание газов и неметаллических включений. Однако при определении жидкотекучести она имеет невысокую воспроизводимость, связанную с трудностью соблюдения стабильных условий заливки и переменным гидростатическим напором при заполнении восходящей части канала.

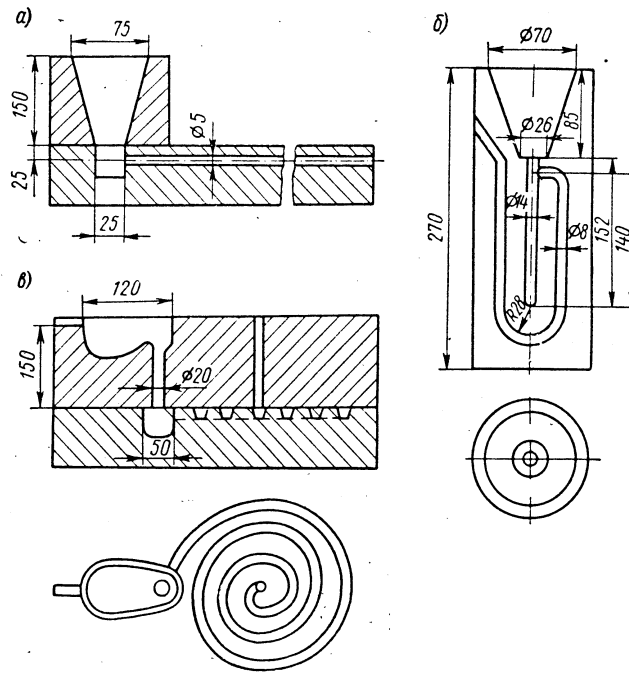


Рис. 6.24. Пробы на жидкотекучесть

2. Проба со спиральным измерительным каналом (рис. 6.24, в).

Канал пробы выполнен в виде спирали, расположенной в горизонтальной плоскости. Канал имеет сечение в виде трапеции высотой 8 мм, шириной 8 мм вверху и 7 мм внизу. Канал заполняется через литниковую чашу с порогом при переходе к стояку и со сливным каналом в верхней части, позволяющим точно зафиксировать гидростатический напор. Внутренний конец спирали снабжен выпором для выхода воздуха и газов. В основании стояка имеется буферный резервуар. При установке мерной чаши со стопором погрешность изменения жидкотекучести составляет $\pm 3,5\%$.

Кривая жидкотекучести имеет два участка (рис. 6.25).

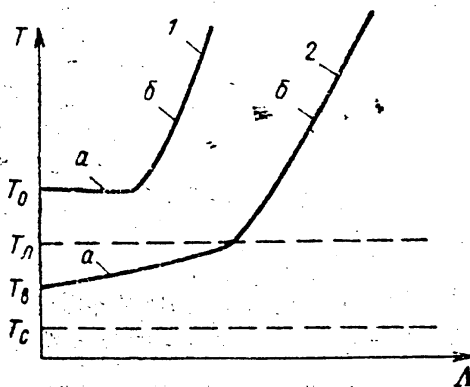


Рис. 6.25. Зависимость жидкотекучести Λ от температуры чистого металла (1) и сплава, кристаллизующегося в интервале температур $T_{л} - T_{c}$ (2)

Первый, начальный участок *a* находится между $T_{л}$ и T_{c} солидуса. Ниже температуры выливаемости (нулевой жидкотекучести) $T_{в}$ заполнения канала не

будет. На участке *a* заполнение происходит, но на небольшую длину. В случае заливки чистого металла участок *a* принимает горизонтальное положение (кривая 1), а в случае заливки сплава (кривая 2) – наклонное.

Второй участок *б* имеет криволинейный характер с кривым наклоном при начальном увеличении температуры.

Практическая жидкотекучесть определяется при одинаковой температуре заливки сплавов данной системы. По мере увеличения концентрации добавки температура ликвидуса чаще всего будет падать, и увеличиваться перегрев, следовательно, жидкотекучесть будет возрастать.

Условная жидкотекучесть определяется при одинаковом перегреве над ликвидусом сплавов данной системы. Этот способ оценки должен лучше выражать физико-химическую сущность явления.

Истинная жидкотекучесть определяется при постоянном перегреве над линией нулевой жидкотекучести на диаграмме состояния. Однако определение ее затруднительно, и она мало отличается от условной.

Должна существовать корреляционная связь между жидкотекучестью, вязкостью и поверхностным натяжением (смачиваемостью). Прямая корреляция наблюдается в шлаковых системах.

Жидкотекучесть возрастает с увеличением теплоты кристаллизации и резко снижается при окислении сплавов.

Возможны три механизма остановки потока жидкого металла в каналах формы (рис. 6.26):

1. Объемная остановка – прекращение течения металла в твердожидком состоянии из-за образования множества дендритов и их обломков и резкого повышения вязкости. Такой механизм характерен для широкоинтервальных сплавов с высокой теплопроводностью, затвердевающих с малой аккумулярующей способностью. Остановка происходит при образовании 20–35 % твердой фазы (рис. 6.26, *a*). Для металлических систем этот механизм маловероятен. Остановка конца потока происходит внезапно, а не постепенно, как этого можно было бы ожидать при увеличении вязкости.

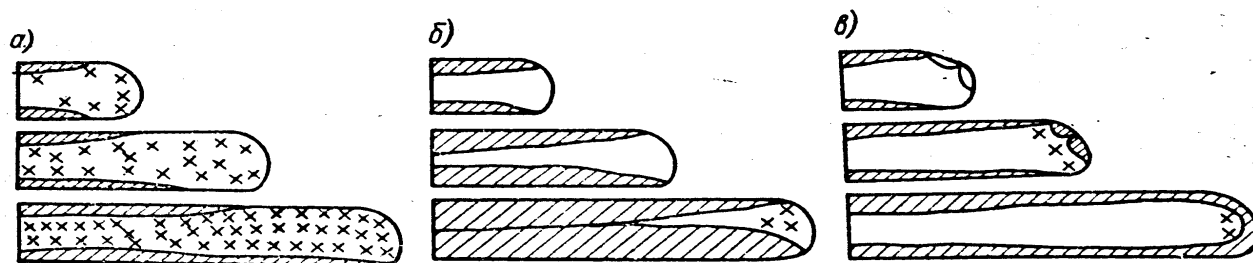


Рис. 6.26. Схема остановки потока при истощении жидкотекучести: *a* – остановка в результате объемной кристаллизации и повышения вязкости металла; *б* – остановка в результате затвердевания потока в начальном сечении канала; *в* – остановка в результате образования пробки на конце потока

2. Остановка может произойти в результате полного затвердевания потока, в начальном сечении, где охлаждение начинается раньше всего (рис.

6.26, б). Остановка потока происходит за счет промерзания начального сечения. Такой случай возможен при малых сечениях канала и низких скоростях движения жидкого металла, а также для узкоинтервальных сплавов с малой теплопроводностью, затвердевающих в форме с высокой теплоаккумулирующей способностью (например, титановые сплавы в графитовой форме). Остановка происходит при образовании 40–60 % твердой фазы (рис. 6.26, б).

3. Остановка может произойти из-за образования на конце потока достаточно прочной пробки (рис. 6.26, в). Пробка образуется за счет накопления кристаллов и пленки окислов. В обычных условиях литья из металлических сплавов реализуется этот механизм остановки. Такой механизм характерен для сплавов с повышенной температурой плавления, с небольшим интервалом кристаллизации, а также для большинства эвтектических сплавов. Остановка происходит при образовании 60–80 % твердой фазы.

Жидкотекучесть Λ можно представить как произведение скорости вытекания расплава из литниковой системы в измерительный канал V (постоянная для данной пробы) на время τ , в течение которого расплав сохраняет способность к движению:

$$\Lambda = V \cdot \tau. \quad (6.58)$$

Скорость истечения для данной пробы равна

$$V = \sqrt{\frac{2gH}{1 + \sum \xi_i}},$$

где H – гидростатический напор, действующий во время заполнения канала.

Для определения времени течения можно использовать следующую полуэмпирическую формулу:

$$\tau = AR^2 \sqrt{t + B \frac{H}{R}}, \quad (6.59)$$

где R – радиус канала; t – перегрев над точкой ликвидуса; H – гидростатический напор; A и B – постоянные для данного сплава и материала формы.

Для спиральной пробы, заливаемой в песчаную форму из среднеуглеродистой стали, ориентировочно $A = 0,25$; $B = 0,1$:

$$\Lambda = AR^2 \sqrt{\frac{2gH \left(t + B \frac{H}{R} \right)}{1 + \sum \xi_i}} \quad (6.60)$$

или

$$\Lambda = A_0 \sqrt{t + B_0},$$

где A_0 и B_0 – постоянные для данной пробы и системы сплавов величины.

Первый член суммы, стоящий под знаком корня в выражении (6.57), соответствует участку b , а второй – участку a кривой $\Lambda = f(t_{\text{зал}})$.

Различие между жидкотекучестью сплавов определяется в наибольшей степени величиной участка a , т. е. временем, в течение которого формируется достаточно прочная пробка на конце потока. Участки b для различных сплавов

примерно одинаковы, так как время охлаждения в жидком сплаве определяется турбулентным переносом жидкого металла в потоке, который практически не зависит от вида сплава.

На рис. 6.27 представлена связь жидкотекучести железоуглеродистых сплавов с диаграммой состояния, а также показано влияние перегрева на жидкотекучесть. Как видно из рис. 6.27, а, величина условной (кривая 1) и практической (кривая 2) жидкотекучести сплавов Fe–C зависит от содержания углерода. Максимальной условной жидкотекучестью обладает эвтектический сплав. Из рис. 6.27, б следует, что основное отличие жидкотекучести различных по содержанию углерода сплавов определяется участком *a* на кривых $\Lambda = f(t)$.

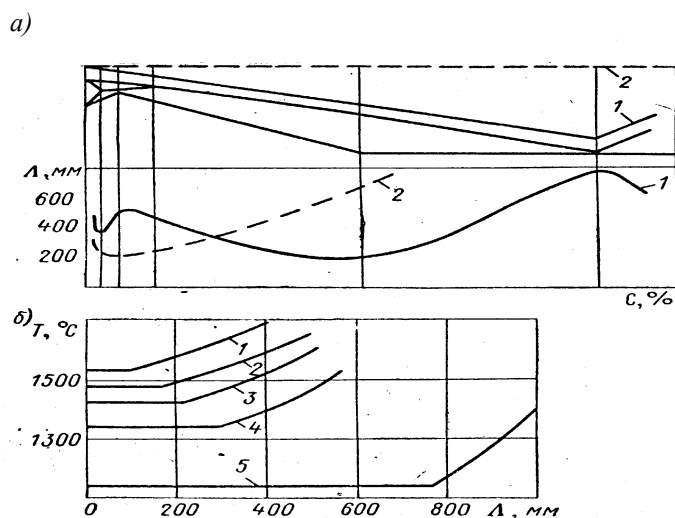


Рис. 6.27. Жидкотекучесть сплавов: а – связь жидкотекучести железоуглеродистых сплавов с диаграммой состояния; б – влияние перегрева на жидкотекучесть железоуглеродистых сплавов (1–0,10 % C; 2–0,35 % C; 3–1,70 % C; 4–2,75 % C; 5–4,3 % C)

Из рис. 6.28 следует:

- что наибольшей жидкотекучестью обладает эвтектический сплав, чистые металлы и интерметаллиды, кристаллизующиеся при постоянных температурах;
- минимальная жидкотекучесть не наблюдается при концентрации предельной растворимости второго компонента в основе сплавов, где интервал кристаллизации достигает максимального значения;
- минимальная жидкотекучесть соответствует точке пересечения нулевой жидкотекучести (штриховая линия) с линией эвтектического превращения, хотя разница в этих двух точках величины жидкотекучести невелика.

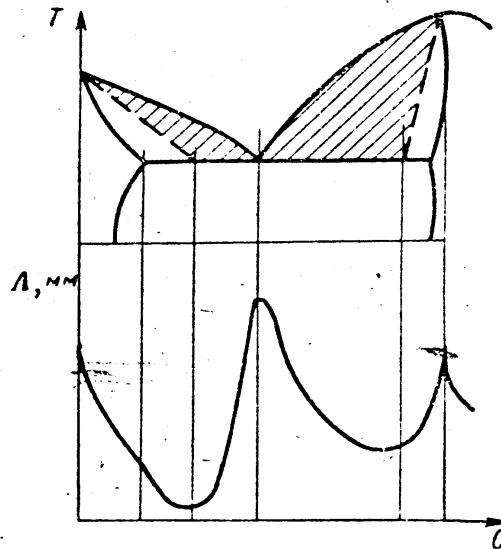


Рис. 6.28. Зависимость жидкотекучести Λ системы сплавов от вида диаграммы состояния

Жидкотекучесть зависит от свойств сплава и формы. В большей степени жидкотекучесть зависит от температурного интервала кристаллизации, точнее от эффективного интервала кристаллизации, расположенного между линией ликвидус и линией нулевой жидкотекучести. Минимум жидкотекучести сплава соответствует максимальному эффективному интервалу кристаллизации. Это объясняется тем, что широкоинтервальные сплавы склонны к объемной кристаллизации и образованию разветвленных дендритов, затрудняющих течение расплава.

Максимальная жидкотекучесть наблюдается у эвтектических сплавов, что обеспечивается последовательным затвердеванием и уменьшением вязкости расплава.

Интересным является изменение вязкости: при постоянной температуре перегрева вязкость при повышенном содержании углерода снижается, однако это снижение обусловлено увеличением перегрева. В действительности при постоянном перегреве над температурой ликвидуса вязкость расплава при повышении содержания углерода до эвтектической концентрации возрастает, так как при этом повышается степень микрогетерогенизации расплава.

Кроме интервала кристаллизации, на жидкотекучесть влияют физические и химические свойства металлов и сплавов.

С повышением содержания в расплаве оксидов, нитридов, сульфидов жидкотекучесть уменьшается, а вязкость возрастает. Повышение температуры вязкость снижается и жидкотекучесть улучшается.

С увеличением поверхностного натяжения жидкотекучесть ухудшается. Образование оксидных пленок на поверхности расплава резко повышает поверхностное натяжение. Поэтому необходимо разрушать такие пленки химическим путем, например, созданием восстановительной атмосферы на границе металл-форма при литье чугунов или повышением содержания в них

фосфора, образующего легкоплавкую эвтектику и уменьшающего вязкость и поверхностное натяжение чугунов.

Зависимость жидкотекучести от теплоемкости сплавов определяют по уравнению

$$Q_{\text{тепл}} = C (T_{\text{зал}} - T_{\text{ликв}}) + xg, \quad (6.61)$$

где $Q_{\text{тепл}}$ – количество отводимой теплоты до момента прекращения течения металла (нулевая жидкотекучесть), Дж; C – удельная теплоемкость, Дж/(кг · К); x – содержание частиц твердой фазы в расплаве при нулевой жидкотекучести; g – удельная скрытая теплота кристаллизации, Дж/кг.

Из уравнения (6.60) следует, что чем больше теплоемкость, удельная скрытая теплота кристаллизации и температура заливки металла, тем больше жидкотекучесть сплава.

Единственным переменным членом уравнения является для конкретного сплава температура заливки.

Однако использование перегрева расплава ограничено, так как высокая температура перегрева (заливки) способствует газопоглощению, образованию грубозернистой структуры, возникновению усадочных дефектов. Поэтому недостающий перегрев металла можно компенсировать подогревом формы.

Жидкотекучесть зависит от свойств формы. Теплоотдача с поверхности расплава формы оценивается через коэффициент, предложенный А. И. Вейником:

$$L = B_{\phi} (\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{\tau}), \quad (6.62)$$

где L – коэффициент, Дж/(м² · с^{1/2} · К); $B_{\phi} = \sqrt{C\lambda\rho}$ – коэффициент теплоаккумулирующей способности литейной формы; C – теплоемкость, Дж/(кг · К); λ – теплопроводность, Дж/(м · К · с); ρ – плотность формы, кг/м³.

С увеличением B_{ϕ} возрастает L , следовательно, жидкотекучесть сплава ухудшается. Например, песчаная форма медленнее отводит тепло, чем металлическая, и жидкотекучесть в ней лучше.

Между стенками формы и расплавом возникает трение, коэффициент трения тем выше, чем больше шероховатость стенки, и тем хуже будет жидкотекучесть. В песчаной форме, чем больше диаметр зерна, тем меньше жидкотекучесть.

Снижает шероховатость нанесением покрытий, созданием газовой прослойки на границе металл-форма. Однако если газов и паров образуется много, форма их не успевает отводить или сама дополнительно выделяет газы, пары, то в форме создается газовое противодавление движущемуся расплаву, и жидкотекучесть ухудшается. В таких случаях необходимо устраивать выпоры на всех выступающих частях отливки.

Заполняемость форм. Комплекс технологических факторов, характеризующих условия заполнения формы, называют заполняемостью. Жидкотекучесть можно рассматривать как составляющую этого комплекса, определяющую качество сплава как литейного материала. Кроме того,

жидкотекучесть можно рассматривать как характеристику заполняемости данным способом формы технологической пробы. Преобразуем формулу (5.52) следующим образом:

$$\frac{\Lambda}{R^2} \leq A \sqrt{t + B \frac{H}{R}} \sqrt{\frac{2gH}{1 + \sum \xi_i}}. \quad (6.63)$$

Жидкотекучесть Λ в этой формуле можно трактовать как максимальную длину стенки отливки толщиной $2R$, которая заполняется при условиях, выражаемых в правой части неравенства как произведение члена, зависящего от условий охлаждения (первый), на член, зависящий от условий течения (второй).

Из выражения (6.63) следует:

- 1) что трудности заполнения будут возрастать обратно пропорционально квадрату толщины стенки отливки;
- 2) чем меньше стенка, тем выше должен быть перегрев для обеспечения заполняемости;
- 3) чем выше теплопроводность материала формы, тем хуже заполняемость;
- 4) на заполняемость литейной формы влияет вид материала (табл. 6.11).

Таблица 6.11

Влияние вида материала на заполняемость

Вид материала формы	Заполняемость, %
Песчано-глинистая смесь:	
сырая	94
сухая	100
Опилочная смесь	118–122
Металлическая форма (чугунная)	60–75

В табл. 6.12 приведены практические данные о рекомендуемых температурах заливки для чугуна и стали при различных толщинах стенок отливок.

Таблица 6.12

Температура заливки в зависимости от толщины стенок

Толщина стенок, мм	Серый чугун	Ковкий чугун	Среднеуглеродистые стали
До 5	1350–1450	1380–1480	–
5–10	1340–1430	1360–1450	1540–1580
10–20	1320–1400	1350–1430	1540–1550
20–50	1300–1380	–	1530–1540
50–100	1230–1340	–	1520–1530
100–200	1200–1300	–	1510–1530
Более 200	1180–1280	–	1500–1530

Для цветных сплавов рекомендуются следующие температуры заливки:
латуни – 1050–1100 °С;

бронзы – 1100–1200 °С;
 алюминиевые сплавы – 670–750 °С;
 магниевые сплавы – 710–770 °С.

Заполняемость вертикальных стенок лучше, чем горизонтальных (рис. 6.29, а). Подвод металла сверху обеспечивает лучшую заполняемость, чем подвод снизу (рис. 6.29, б). Утолщение стенок, расположенных вдоль направления потока, улучшает заполняемость, а расположенных поперек потока, ухудшает ее (рис. 6.29, в). Для облегчения заполняемости применяют рассредоточенный подвод несколькими литниками (рис. 6.29, г).

Заполнение особо тонких элементов отливок, толщиной менее 5 мм, связано с преодолением поверхностного натяжения сплава (например, при литье по выплавляемым моделям).

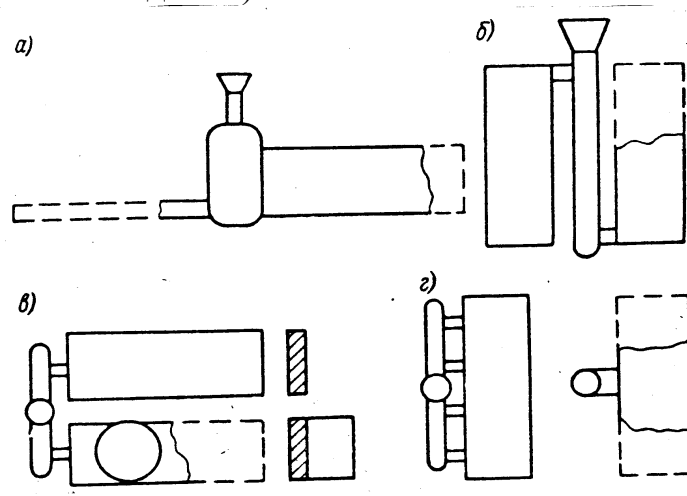


Рис. 6.29. Схемы заполняемости элементов отливок

Для этой цели необходим гидростатический напор

$$H = \frac{2\sigma \cos Q}{Rg\rho}, \quad (6.64)$$

где Q – угол смачивания металлом материала формы; ρ – плотность жидкого металла.

Таким образом, заполняемость зависит от жидкотекучести, конструкции формы, ее размеров, расположения отдельных элементов, способа подвода металла и условий литья и др.