



ОСНОВЫ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А. И. Вальтер,
А. А. Протопопов



«Инфра-Инженерия»

А. И. Вальтер, А. А. Протопопов

ОСНОВЫ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Учебник

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2019

УДК 621.74
ББК 34.61
В16

Рецензенты:

Чудин В. Н., проф., д-р техн. наук, лауреат Государственной премии РФ
(Московский государственный университет путей
сообщения – МИИТ, г. Москва);

Золотухин В. И., проф., д-р техн. наук, ген. директор НПП «Вулкан-ТМ» (г. Тула)

Вальтер, А. И., Протопопов, А. А.

В16 Основы литейного производства : учебник / А. И. Вальтер, А. А. Протопопов – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2019. – 332 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0363-4

Изложены основные положения теории и технологии процессов литейного производства для различных материалов и сплавов. Приведены базовые принципы разработки технологии художественного литья монументов, памятников. Рассмотрены характеристики литейного процесса, необходимые для компьютерного моделирования при выборе оптимального способа литья и определении технологических параметров.

Для преподавателей, аспирантов и студентов металлургических и машиностроительных специальностей всех уровней обучения.

УДК 621.74
ББК 34.61

ISBN 978-5-9729-0363-4

© Вальтер А. И., Протопопов А. А., 2019

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2019

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2019

ВВЕДЕНИЕ

Изложены особенности технологии производства отливок из различных чугунов и сталей; сплавов меди, алюминия и магния, процессы поздней внепечной обработки металлических расплавов в литейной форме и в процессе ее заливки; приведены конструкции и технологические варианты производства литосварных заготовок и деталей; дана краткая информация о технологических вариантах изготовления художественных отливок.

Литье является одним из старейших способов, которым еще в древности пользовались для производства металлических изделий – вначале из меди и бронзы, затем из чугуна, а позже из стали и других сплавов.

Первым литейным заводом в России по производству бронзовых отливок был пушечно-литейный завод (Пушечная изба), построенный в Москве в 1479 г.

В России были изготовлены самые крупные в мире отливки, такие, как «Царь-колокол» (Иваном Моториным), «Царь-пушка», (Андреем Чоховым), замечательные произведения искусства: памятник Минину и Пожарскому, «Медный всадник» и т.д. Первые чугунные отливки изготавливались на металлургических заводах непосредственно из жидкого металла, выплавленного в доменных печах. Позже на машиностроительных заводах стали строить самостоятельные чугунолитейные цехи, где в специальных печах переплавляли чушковый доменный чугун с металлическим ломом. Цех такого типа впервые был построен в 1774 г. на Гусевском заводе, где были установлены опрокидывающиеся шахтные печи – прототип современных вагранок. В 1868 г. на Мальцевских заводах впервые были получены стальные фасонные отливки.

Основными процессами литейного производства являются плавка металла, изготовление форм, заливка металла и охлаждение, выбивка, очистка, обрубка отливок, термическая обработка и контроль качества отливок.

В зависимости от металлов, из которых изготавливают отливки, различают отливки из черных металлов и сплавов (стали, серого и ковкого чугуна), а также отливки из цветных металлов и сплавов (медных, алюминиевых, магниевых).

Основным способом изготовления отливок до настоящего времени остается литье в песчаные формы, в которых получают около 80 % отливок от общего количества. Однако точность и шероховатость поверхности отливок, полученных в песчаных формах, во многих случаях не удовлетворяют требованиям современного машиностроения. В связи с этим в последнее время бурно развиваются специальные способы литья: в металлические формы (кокили),

под давлением, по выплавляемым моделям, центробежное, в оболочковые формы, позволяющие получить отливки повышенной точности, с минимальной шероховатостью поверхности и незначительным объемом механической обработки.

Выплавку металла чаще всего производят электроплавкой, причем в ряде цехов собственно плавку ведут в ночное время с использованием наиболее дешевой электроэнергии, с последующим миксированием и раздачей металла в течение дня на разливку. При применении электроплавки шихта хорошо подготавливается, прокаливается, поэтому при загрузке в печь не выделяются дым и газы. Практически во всех цехах производят модифицирование чугуна, как в ковше, так и непосредственно в форме. Широко применяются вибротранспортеры, особенно при перевозке отливок, во время их охлаждения и сортировки. На вибротранспортерах после выбивки форм происходит их разрушение, выбивка стержней и охлаждение отливок. По мнению американских специалистов, вибротранспорт значительно эффективнее других транспортных средств: пластинчатых и ленточных конвейеров.

Кондиционные исходные материалы, хорошая отделка стержней и форм приводят к заметному снижению трудоемкости финишной обработки отливок. Основным материалом литых деталей и изделий является чугун – сплав на основе железа с содержанием на менее 2,14 % углерода, имеющий в своей структуре эвтектику.

В машиностроении на долю чугунных отливок приходится в среднем 75 % всей массы литья. В России 20–22 % отливок производят из стали, а в передовых промышленно развитых странах – 10–12 %. Сталь, даже углеродистая, по литейным свойствам хуже чугуна, а широкий сортамент высокопластичных и прочных чугунов конкурентоспособен в отливках со сталями, имеющими прочность на разрыв $\sigma_B=750$ МПа и даже более.

Конкурентами черным сплавам в производстве отливок становятся и литейные сплавы алюминия, механическая прочность которых в пересчете на удельную массу не уступает им. В ряде производств приходится создавать сложные заготовки и отдельно отлитых фасонных элементов с последующей их сваркой. Существующие способы сварки позволяют это осуществлять в широком диапазоне толщин стенок литых элементов и марок сталей и даже чугунов.

Расширяется выпуск отливок из сплавов меди, титана, магния, при этом все они имеют специфические присущие им литейные свойства, которые следует учитывать при разработке технологического процесса как для изготовления литейной формы, так и для выплавки надлежащего сплава. Дискуссионные вопросы возникают при выборе материала отливки, его выплавки и внепечной обработки, заливки, термической обработки, а также при отработке конструкции

отливки на технологичность и разработке конструкции литейной формы, обеспечивающей получение качественной отливки.

По сравнению с другими способами изготовления заготовок для деталей машин (прокатка, ковка, сварка) литейное производство обладает значительными преимуществами. Литьем можно изготавливать заготовки любой конфигурации с минимальными припусками на механическую обработку, хорошими механическими свойствами. Технологический процесс изготовления отливок механизирован и автоматизирован, что снижает стоимость литых заготовок по сравнению с поковками, сварными конструкциями, деталями из проката. Дальнейшее совершенствование технологии, механизация и автоматизация изготовления отливок, повышение их качества осуществляются на базе научных исследований. Достижения современной науки во многих случаях позволяют коренным образом изменить технологический процесс, резко увеличить производительность труда, создать новые высокопроизводительные литейные машины и автоматы.

ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ФОРМИРОВАНИЯ ОТЛИВКИ

Получение изделий из жидкого расплава сопряжено со сложнейшими процессами, которые обуславливают появление в отливках различного рода дефектов.

Для получения качественных заготовок литейщик должен уметь на научной основе управлять формированием отливок. Оптимальное управление технологией получения отливок основывается на глубоком знании разнообразных процессов, исследование сущности которых составляет предмет дисциплины «Теория литейных процессов».

В настоящее время теория литейных процессов является базой как для прогнозирования качества изготавливаемых отливок, так и для определения оптимальных значений комплекса технологических параметров.

1.1. Теория жидкого состояния расплавов

В теории жидкого состояния, как и в теории твердого тела, под структурой понимают пространственное расположение атомов.

Известно, что в кристалле имеется ближний и дальний порядок, а в жидкости – только ближний. Ближний порядок можно определить как упорядоченное расположение атомов, окружающих произвольно выбранный центральный атом на расстоянии порядка межатомного R_a . Дальний порядок в структуре кристалла – правильное периодическое расположение атомов в узлах трехмерной решетки, образуемой повторяющимися элементами кристалла. Дальний порядок распространяется на расстояния, по крайней мере, в десятки раз превышающие межатомное (для бесконечной идеальной решетки – на бесконечно большое расстояние). При плавлении дальний порядок исчезает. На расстоянии, в 3–4 раза превышающем межатомное, положение атома в любой точке жидкости равновероятно, как в газе, а плотность жидкости равна среднему значению ρ_0 . Упорядоченное расположение атомов в жидкости сохраняется лишь на небольших расстояниях, в области ближнего порядка.

В начале 20-х годов XX века Я.И. Френкель [23] разработал квазикристаллическую модель строения жидкости. Согласно этой модели в жидкости сохраняются черты ближнего порядка, характерного для твердого тела вблизи температуры плавления $T_{пл}$. Предположение о квазикристаллическом строении жидкости он обосновал близостью ряда структурных и физических характеристик металлов в жидком и твердом состояниях вблизи $T_{пл}$ – плотности, энтальпии, теплоемкости

и др. Квазикристаллическая модель позволила правильно предсказать комплекс свойств жидкости вблизи тел. Методом «размытия» кристаллической решетки удастся оценить структурные параметры жидкости – межатомные расстояния и число ближайших соседей.

Так, у твердого *Fe* расстояние между ближайшими соседями R_a при $T=1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 0,2545 нм, у жидкого *Fe* при $T=1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 0,254 нм. Практически не изменяется величина R_a при плавлении *Au*, *Pb*, *Cu*, *Al* и других металлов.

При плавлении изменяются строение и свойства металлов. На рентгенограммах металлов в различных состояниях видно, что у твердых металлов имеются острые максимумы, в жидком состоянии вблизи температуры плавления имеются максимумы размытые, а близко к температуре кипения – максимумы исчезают (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Рентгенограммы металлов:
1 – при $T_{\text{кип}}$; 2 – при $T_{\text{пл}}$; 3 – при $T_{\text{кип}}$

Таким образом, температура плавления и температура кипения являются пороговыми величинами: при температуре плавления разрушается дальний порядок, характерный для кристаллического состояния, но сохраняется ближний порядок, т.е. порядок в пределах нескольких межатомных расстояний. При температуре кипения нарушается ближний порядок, и металл утрачивает свойства твердого тела.

При плавлении металлов сохраняется высокое значение координационного числа K . Так, у плотноупакованных металлов в твердом состоянии $K=12$, а при плавлении $K=8\ldots 10$, т.е. каждый атом теряет только 2–3 соседа. Следовательно, в жидком состоянии частично сохраняется расположение атомов, характерное для твердого состояния. При этом межатомное расстояние и плотность, изменяются не более чем на 3–6 %.

1.2. Температура плавления и плотность металлов и сплавов

От температуры плавления металла зависят способ его плавки, материал футеровки плавильной печи или тигля и линейной формы. Температура плавления и плотность всех основных литейных металлов приведены в табл. 1.1.

Плотность металлов измеряется массой в единице объема. Значение плотности используют в расчетах массы расплава или отливок по геометрическим размерам или их объемам, если известна масса.

Из приведенных в табл. 1.1 металлов самым легким является цинк, а наиболее тяжелым – вольфрам, имеющий плотность более 19 г/см³. Температура плавления металлов охватывает промежуток от 419 °С у цинка до 3400 °С у вольфрама.

Таблица 1.1
Температура плавления и плотность металлов

Металл	Атомная масса	Температура плавления, °С	Плотность, г/см ³		Изменение удельного объема при плавлении ΔV, %
			Твердого металла при комнатной температуре	Жидкого металла при температуре плавления	
Цинк	65	419	7,10	6,60	4,0
Магний	24	650	1,70	1,59	3,0
Алюминий	27	660	2,70	2,37	6,1
Медь	64	1083	8,92	8,00	5,3
Марганец	59	1240	7,40	6,75	-
Кремний	28	1430	2,35	2,53	10,0
Никель	59	1455	8,90	7,90	5,3
Железо	56	1539	7,87	7,00	5,0
Титан	48	1670	4,50	4,10	4,0
Молибден	96	2620	10,20	9,30	4,0
Вольфрам	184	3400	19,20	17,60	3,0

Металлы, имеющие температуру плавления ниже 500-600 °С, называют легкоплавкими. В табл. 1.1 к легкоплавким относится цинк. Принято также выделять тугоплавкие металлы, обладающие более высокой температурой плавления, чем железо, то есть (табл. 1.1) это титан, молибден и вольфрам.

Из табл. 1.1 видно, что по плотности металлы при комнатной температуре также имеют очень широкий промежуток значений.

В технике принято выделять группу легких металлов, служащих основой конструкционных металлических материалов. К легким металлам относят те, у которых плотность не превышает 5 г/см³, то есть в эту группу входят титан, алюминий, магний.

Температуру плавления сплава рассчитывают с учетом концентрации, атомной массы и понижения температуры плавления основного металла:

$$T_{пл.спл} = T\%aT_{пл.ме} - (\%bT_{пл.а} + \%iT_{пл.б} + \dots\% \Delta T_{пл.и}), \quad (1.1)$$

где $T_{пл.б}$ – температура плавления чистого металла;
 $\%a, \%b, \%i$ – массовые доли отдельных элементов в сплаве;
 $\Delta T_{пл.и}$ – снижение температуры плавления чистого металла, вызванное одним массовым процентом каждого данного элемента соответственно.

Например, температура плавления чистого железа снижается в присутствии одного массового %: $Cu - 1^\circ C$; $V, Mo, Mn - 2^\circ C$; $Al - 3,5^\circ C$; $Si - 12^\circ C$; $Ti - 18^\circ C$; $P - 28^\circ C$; $S - 30^\circ C$; $C - 73^\circ C$; $B - 90^\circ C$.

С повышением температуры от комнатной до температуры плавления плотность большинства металлов уменьшается на 3-5 % вследствие того, что переход металла в жидкое состояние сопровождается увеличением объема. Исключения составляют гелий, висмут, сурьма, германий и кремний, которые при плавлении уменьшаются в объеме при соответствующем повышении плотности расплава.

Изменение плотности сплава при переходе из жидкого состояния в твердое предопределяет возникновение объемной усадки. В отливках из сплавов с положительным значением $\Delta\rho$ усадка проявляется в виде усадочных раковин и мелких пор, а с отрицательным значением $\Delta\rho$ – в виде наростов (выдавленных на поверхность отливки).

Наряду с плотностью ρ , для описания свойств металлов используется обратная величина – удельный объем $V=1/\rho$, [см³/г]. С повышением температуры плотность всех металлов в твердом состоянии уменьшается, удельный объем соответственно увеличивается. Увеличение удельного объема твердого металла, не испытывающего полиморфных превращений, при нагреве на Δt может быть довольно точно описано линейной зависимостью $V_{тв}^t = V_{тв}^{20}(1\beta + \Delta_{тв}t)$, где $\beta_{тв}$ – температурный коэффициент объемного расширения. Как известно из физики, $\beta_{тв}=3\alpha$, где α – температурный коэффициент линейного расширения в данном температурном интервале.

Переход металла в жидкое состояние сопровождается в основном увеличением объема и соответствующим уменьшением плотности. В табл. 1.1 это выражено через изменение удельных объемов $\Delta V = V_t - (V_{тв} / V_{ж}) \cdot 100\%$, где $V_{ж}$ и $V_{тв}$ – удельные объемы жидкого и твердого металла при температуре плавления. Можно показать, что

$$\Delta V = \frac{V_{ж} - V_{тв}}{V_{ж}} 100\% = \frac{\rho_{ж} - \rho_{тв}}{\rho_{ж}} 100\%. \quad (1.2)$$

Уменьшение плотности при плавлении выражается несколькими процентами. Кроме того, имеется несколько металлов и неметаллов, у которых наблюдаются обратные изменения плотности и удельного объема при плавлении. Галлий, висмут, сурьма, германий, кремний уменьшаются в объеме при плавлении, и поэтому у них ΔV имеет отрицательные значения. Для сравнения можно отметить, что плавление льда сопровождается уменьшением объема, т.е. для воды $\Delta V = -11\%$.

Незначительное изменение объема металлов при плавлении свидетельствует о том, что расстояние между атомами в жидком металле мало отличается от межатомных расстояний в кристаллической решетке.

Повышение температуры жидкого металла вызывает постепенное изменение его свойств и приводит к постепенным структурным перестройкам, которые выражаются в понижении координационного числа и постепенном исчезновении ближнего порядка в расположении атомов. Вызываемое повышением температуры увеличение удельного объема расплава может быть приближенно описано линейной зависимостью $V_{ж}^t = V_{ж}^0 (1\beta + \Delta_{ж} t)$. Температурный коэффициент объемного расширения жидкого металла $\beta_{ж}$ существенно больше, чем таковой же коэффициент твердого металла. Обычно $\beta_{ж} = 1,5-3\beta_{тв}$.

Сплавы как в твердом, так и в жидком состоянии в общем случае не являются совершенными растворами, и сплавление двух и более металлов всегда сопряжено с изменением объема.

Как правило, отмечается уменьшение объема сплава в сравнении с суммарным объемом чистых компонентов с учетом их содержания в сплаве. Однако для технических расчетов можно пренебречь уменьшением объема при сплавлении. В этом случае удельный объем сплава может быть определен по правилу аддитивности, то есть по значениям удельных объемов чистых компонентов с учетом их содержания в сплаве. Таким образом, удельный объем сплава, который состоит из компонентов $A, B, C, \dots, X$, содержащихся в процентах по массе в количестве $a, b, c, \dots, x$, соответственно составляет

$$V_{спл} = \frac{V_A a + V_B b + V_C c + \dots + V_X x}{100}, \quad (1.3)$$

где $V_A, V_B, V_C, \dots, V_X$ – удельные объемы чистых компонентов при той же температуре, для которой вычисляется удельный объем сплава.

Важно иметь в виду, что указанное правило аддитивности в том виде, как оно написано выше, справедливо именно для удельного объема сплава. Если заменить удельные объемы плотностями, то получается значительно более сложное выражение, поэтому целесообразнее пользоваться именно удельными объемами.

В научных исследованиях часто используется величина, называемая атомным объемом или объемом грамм-атома металла или сплава. Эту величину находят делением атомной массы на плотность. Для металлов атомный объем имеет пределы 5–20 см³, чаще 8–12 см³.

Плотность зависит от природы вещества (сплава), от комплекса индивидуальных свойств элементов, входящих в его состав, и вида их взаимодействия. Одно и то же вещество (металл) может иметь разную плотность в зависимости от кристаллического строения, типа кристаллической решетки.

Например, $Fe_{\alpha}=768$ и $Fe_{\gamma}=7,76$; $C_{алм}=3,51$, $C_{граф}=2,23$; $\alpha_{кварц}=2,65$, $\beta_{кварц}=2,51$ и др.

Важно учитывать различие понятий «плотность» и «удельный вес» материала.

Плотность – это отношение массы вещества к занимаемому объему:

$$\rho = m / V, \quad (1.4)$$

где m – масса, г (кг); V – объем, см³ (м³);
 ρ – плотность, г/см³ (кг/м³).

Удельный вес определяют как отношение веса вещества к занимаемому объему:

$$\gamma = P / V, \quad (1.5)$$

где P – вес, (н);
 γ – удельный вес, см³ (м³).

Вес находят по отношению:

$$P = mg \text{ или } P = kmg, \quad (1.6)$$

где g – ускорение свободного падения;
 k – коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц измерения входящих в формулу величин.

И, следовательно,

$$\gamma = \rho g. \quad (1.7)$$

Масса тела является неизменной величиной и мерой гравитационных и инерционных свойств вещества, а вес – величина переменная, зависящая от ускорения свободного падения в точке наблюдения. Поэтому удельный вес не может являться справочной величиной.

Отношение масс двух тел в одной и той же точке наблюдения равно отношению весов этих тел:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{m_1 g}{m_2 g} = \frac{k m_1 g}{k m_2 g} = \frac{P_1}{P_2} = \frac{G_1}{G_2}. \quad (1.8)$$

Поэтому при взвешивании находят массу тела в сопоставлении ее с массой гирь. В результате взвешивания определяют массу материала.

На практике плотность определяют для выявления изменений в конечном виде металла по сравнению с исходным. Поэтому имеет значение установление плотности, а не разница плотностей или, что еще более показательно, – отношение плотностей:

$$\Delta\rho = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} 100 \%. \quad (1.9)$$

Методы определения плотности классифицируются по групповым признакам: весовым, объемным, иммерсионным.

К весовым методам относятся гидростатическое взвешивание, микрометрический метод, ареометрический метод постоянного объема и массы и др. Это наиболее распространенные и точные методы.

К объемным – определение объема образца путем линейных измерений (образец правильной формы) с помощью газовых или жидкостных волюмометров. Объемные методы (по геометрическим размерам) дают возможность сделать точные вычисления при больших объемах образцов.

Уравновешивание плотности в жидкости называют иммерсионным методом. К нему также относится метод термоградиентной трубки и др.

Кроме перечисленных, используют еще и механические, радиационные, рефрактометрические, аналитические и другие методы определения плотности по косвенным показателям.

Чтобы расплавленный металл хорошо заполнял форму, поверхностное натяжение и вязкость его не должны препятствовать поступательному движению расплава до тех пор, пока она не будет полностью заполнена. Вязкость, поверхностное натяжение и диффузия влияют на процессы рафинирования, легирования, модифицирования сплавов.

1.3. Вязкость металлов и сплавов

Вязкость, или внутреннее трение, представляет собой внутреннее сопротивление, оказываемое взаимному перемещению смежных слоев жидкости, поэтому и определять ее можно только при движении расплава.

В то время как твердое тело обладает свойством оказывать сопротивление самой деформации, жидкость оказывает сопротивление увеличению скорости деформации. Это свойство жидкости называется вязкостью.

Различные тела по-разному ведут себя под действием приложенной нагрузки (рис. 1.2). Модель 1 характеризуется наличием линейной связи между касательным сдвиговым напряжением τ и поперечным градиентом скорости

dV/dx , или скоростью деформации $d\varepsilon/d\tau$ (рис. 3). При этом смещение слоев происходит при любом малом приложенном сдвиговом усилии. Такая реологическая модель отвечает так называемой ньютоновской жидкости и описывается уравнением

$$\tau = \eta \frac{dV}{dx} = \eta \frac{d\varepsilon}{d\tau}. \quad (1.10)$$

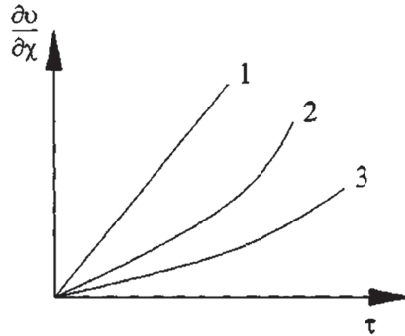


Рис. 1.2. Различные виды реологических моделей:
1 — ньютоновская жидкость¹; 2 — неньютоновская жидкость;
3 — тело Бингама²

Реологический коэффициент η принято называть динамической вязкостью жидкости. Кривая 2 (рис. 1.2) иллюстрирует поведение неньютоновской жидкости, где величина η зависит от скорости деформации. Зависимость 3 отвечает реологическому телу Бингама, течение которого начинается только тогда, когда нагрузка превзойдет статическое напряжение сдвига. В этом случае

$$\tau = \tau_{0B} + \eta \frac{dV}{dx}. \quad (1.11)$$

Исследования по течению расплавленных металлов показывают, что при температурах выше ликвидуса жидкие сплавы по реологическому состоянию близки к вязким ньютоновским жидкостям. В интервале кристаллизации, где система становится гетерофазной, сплав отвечает уже более сложной реологической

¹ Ньютоновская жидкость (названная так в честь Исаака Ньютона) — вязкая жидкость, подчиняющаяся в своём течении закону вязкого трения Ньютона, то есть касательное напряжение и градиент скорости в такой жидкости линейно зависимы. Коэффициент пропорциональности между этими величинами известен как вязкость.

² Бингамовская жидкость (бингамовский пластик, пластик Бингама, модель Бингама) — жидкость, имеющая начальный предел текучести τ_0 ниже которого она не течет и имеет свойства твердого тела.

модели, более близкой к зависимости (1.2), причем величина τ_0 увеличивается с ростом количества твердой фазы в потоке вплоть до полной потери текучести.

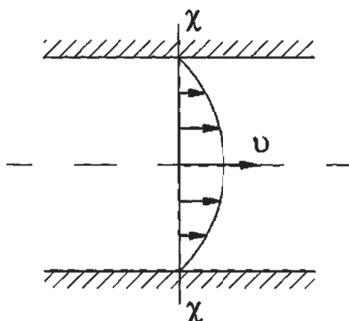


Рис. 1.3. Градиент скорости в поперечном сечении потока

Величина, обратная вязкости, является мерой текучести, следовательно, чем меньше вязкость, тем больше текучесть.

Вязкость η представляет собой отношение касательного напряжения τ , действующего между слоями текущего вещества в направлении его движения, к величине градиента скорости dV/dx , перпендикулярного к потоку. Динамическая вязкость

$$\eta = \frac{\tau}{dV/dx} \quad [\text{Па} \cdot \text{с}]. \quad (1.12)$$

Вспомогательной единицей измерения является Пуаз: $\Pi=0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Влияние внутреннего трения на скорость течения расплава лучше выражает кинематическая вязкость, учитывающая плотность расплава:

$$\nu = \eta / \rho \quad [\text{м}^2 / \text{с}]. \quad (1.13)$$

Вспомогательной единицей измерения является стокс: $\text{Ст}=10^{-4} \text{ м}^2 / \text{с}$.

Вязкость зависит от удельной теплоемкости металла, от скрытой теплоты плавления и теплопередачи от металла к форме.

В значительной мере влияют включения, присутствующие в расплаве, при этом влияют как их количество, так и их температура плавления.

При понижении температуры расплава вязкость возрастает, и особенно сильно при температуре ниже температуры ликвидуса, когда сплав переходит в жидко-твердое состояние.

Динамическая вязкость металлов в 2–7 раз превышает вязкость воды при комнатной температуре, а кинематическая вязкость во многих случаях меньше, чем у воды (табл. 1.2). Это позволяет рассматривать жидкие металлы как

относительно маловязкие жидкости, обладающие в изотермических условиях хорошей текучестью: $\varphi=1/\eta$.

Динамическая вязкость падает при повышении температуры металла. Так, у ртути это падение составляет около 30 % при нагреве от 0 до 100 °С. Вязкость алюминия уменьшается в 1,5 раза при нагреве от 700 до 800 °С.

Температурная зависимость динамической вязкости выражается экспоненциальным законом

$$\eta = A_{\text{exp}} Q / RT, \quad (1.14)$$

где A – постоянная величина;
 R – газовая постоянная;
 T – термодинамическая температура, К;
 Q – энергия активации вязкого течения, Дж/г.

Таблица 1.2
Вязкость некоторых жидких металлов

Материал	$T, ^\circ\text{C}$	$\eta \cdot 10^3, \text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$	$\nu \cdot 10^3, \text{м}^2 / \text{с}$
Железо	1550	7,0	1,0
Чугун (3% С, 2 % Si)	1330	7,4	1,1
Сталь (0,5 % С)	1500	6,0	0,9
Никель	1450	5,0	0,65
Медь	1100	3,6	0,45
Алюминий	700	2,8-3,8	1,2-1,6
Цинк	450	3,2	0,46
Свинец	350	2,6	0,25

С увеличением давления уменьшается среднее расстояние между частицами и усиливается взаимосвязь между ними. В связи с этим растет сопротивление сдвигу, а следовательно, и вязкость.

Наибольшие колебания внешнего атмосферного давления, а также металлостатический напор в ковше или в форме не могут сколько-нибудь существенно изменить величину вязкости металла. Однако в машинах для литья под давлением удельные давления достигают 300-400 МПа. При этом вязкость металла возрастает в десятки раз.

Известно, что в сплавах энергии взаимодействия одноименных и разноименных частиц могут отличаться. Это может приводить к возникновению различных фаз, а в крайних случаях – к образованию интерметаллических соединений или к несмешиваемости компонентов.

Жидкий бинарный сплав можно рассматривать как раствор из атомов A и B . Если обозначить силы связи между одноименными и разноименными атомами как F_{AA} , F_{BB} , и F_{AB} , то возможны следующие случаи:

$$F_{AA} \approx F_{BB} \approx F_{AB}; \quad (1.15)$$

$$F_{AA} < F_{AB} > F_{BB}; \quad (1.16)$$

$$F_{AA} > F_{AB} < F_{BB}; \quad (1.17)$$

$$F_{AA} > F_{AB} > F_{AB}. \quad (1.18)$$

Соотношение (1.15) характеризует образование идеального раствора, силы связи между отношениями и разноименными атомами близки. Случай (1.16) указывает на наличие мощных сил связи между разноименными атомами, при смешении происходит выделение тепла. Соотношение (1.17) является признаком сопротивляемости компонентов смешению и обуславливает наличие химической неоднородности в расплаве. В случае (1.18) также будет химическая неоднородность, однако теплота смешения может быть и положительной, и отрицательной.

На рис. 1.4 представлены основные типы диаграмм состояния бинарных сплавов, отвечающие соотношениям (1.15)-(1.17), в сопоставлении с характерными для них изотермами вязкости расплавов. Для бинарных систем с неограниченной растворимостью в жидком и твердом состоянии (1.18), атомы в расплаве находятся в статистическом распределении, и вязкость незначительно отклоняется от правила аддитивности (рис. 1.4, а).

В системах с интерметаллическими соединениями (1.16), действие сил притяжения между разноименными атомами вызывает увеличение вязкости расплава (рис. 1.4, б). На изотерме вязкости обычно имеется максимум, или изгиб (1.18), координата которого близка к концентрационной точке, отвечающей химическому соединению. Образование химического соединения сопровождается настолько значительным изменением вязкости, что это позволило выделить системы, где подобные явления имеют место, в особый класс систем с сингулярными точками. Таким образом, существует связь между изотермой вязкости сингулярной системы и кривой ликвидуса, где также имеется сингулярная точка, отвечающая химическому соединению.

Несколько сложнее ведут себя эвтектические сплавы (1.17), для которых, однако, в большинстве случаев наблюдается минимум вязкости, отвечающий эвтектической точке (рис. 1.4, в).

Таким образом, вязкость (при небольших перегревах ликвидусом) является структурно-чувствительным свойством, активно реагирующим на особенности строения жидкого сплава.

Жидкие металлы и сплавы всегда содержат большое количество взвешенных включений.

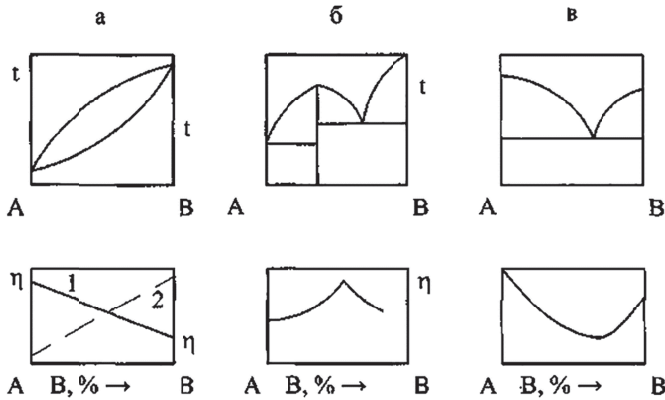


Рис. 1.4. Вид изотерм вязкости в системах:
а – с неограниченной растворимостью;
б – с химическим соединением; *в* – с эвтектикой

Количество, форма, состояние (жидкое или твердое) и распределение неметаллических включений влияют на вязкость сплава.

Когда в жидком металле образуются твердые включения, его вязкость существенно повышается.

Так, проведение раскисления металла в большинстве случаев приводит к образованию мелкодисперсных твердых продуктов (например, SiO_2 , Al_2O_3 в сталях). Введение азота для уменьшения зерна в ферритную высокохромистую сталь повышает ее вязкость вследствие образования тугоплавких нитридов хрома. В чугунах текучесть может понижаться за счет твердых включений MnS , а также графита. Алюминиевым сплавам свойственно ухудшение текучести ввиду образования Al_2O_3 и т.д.

Присутствие твердых взвешенных частиц увеличивает вязкость литейного сплава и усложняет заполнение литейных форм.

Сравнивая между собой значения кинематической вязкости различных металлов, можно видеть, что величина ν связана с атомным объемом $V_{ат}$: чем больше атомный объем металла, тем меньше его вязкость (рис. 1.5). Эта зависимость приближенно характеризуется соотношением

$$\nu = K \frac{1}{V_{ат}}, \quad (1.19)$$

где $K=4\dots 5$.

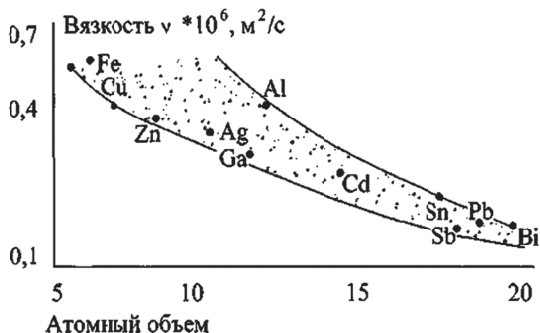


Рис. 1.5. Соотношение между вязкостью металлов и их атомным объемом

Есть еще одна характеристика, проявляющая связь с величиной ν — это энтропия, отражающая степень упорядочения атомов в системе. Кинематическая вязкость металла тем больше, чем меньше его энтропия, т.е. чем слабее происходит разупрочнение структуры при нагреве (рис. 1.6).

Таким образом, два параметра могут служить средством оценки вязкости металлов: а) атомный объем как геометрический фактор; б) стандартное значение энтропии как энергетический фактор.



Рис. 1.6. Соотношение между вязкостью жидких металлов и стандартным значением энтропии

Сравнение характера течения расплавов в форме можно осуществить только при достижении одинакового числа Рейнольдса в обеих системах:

$$\text{Re} = \frac{V_1 D_1}{\nu_1} = \frac{V_2 D_2}{\nu_2}, \quad (1.20)$$

где D является характеристическим размером (при течении через трубку это диаметр трубы);
 V — скорость потока.

Если число Рейнольдса имеет большое значение (например, для серого чугуна более 7000, для литой стали более 3500), то в данном литейном канале течение становится турбулентным, и количество протекающей жидкости (расплава) понизится по сравнению с приведенным уравнением для ламинарного течения в трубке.

Так как при большой вязкости движение расплава замедляется, то вязкие расплавы для заполнения формы требуют более продолжительного времени. Во время заполнения формы снижается температура расплава, ухудшается его текучесть, поэтому очень вязкий расплав качественно не заполнит форму, что приведет к недоливу отливки.

Определение вязкости жидких металлов представляет большие трудности вследствие высокой температуры и большой реакционной способности металлических расплавов. Для измерения вязкости жидких металлов и сплавов применяют следующие методы: ротационный и вибрационный, затухающих крутильных колебаний и падающего шарика.

Схема ротационного метода представляет собой два цилиндра, один в другом, внешний из них принудительно вращается. Вязкость определяется в зависимости от угловой скорости вращающегося внешнего цилиндра и крутящего момента M_k , оцениваемого по углу поворота внутреннего цилиндра по уравнению

$$\eta = \frac{M_k}{4\pi(1+C)} \frac{l}{R_1^2} \frac{l}{R_2^2}, \quad [Pa \cdot c], \quad (1.21)$$

где M_k – крутящий момент, Н/м;
 R_1, R_2 – радиусы цилиндров, м;
 l – длина погруженного цилиндра, м;
 ω – угловая скорость, рад/с;
 C – поправочный коэффициент, учитывающий концевой эффект цилиндров (определяется опытным путем).

Можно также данный прибор проградуировать по материалу, вязкость которого известна (например, по касторовому маслу). При этом константу прибора k определяют из упрощенного уравнения

$$\eta = k \frac{M_k}{\omega}. \quad (1.22)$$

Обычно приборы построены так, что внешний цилиндр может вращаться с постоянной скоростью в диапазоне $n=0,5 \dots 50$ об/мин. В этом случае измеряется крутящий момент M_k , обусловленный трением расплава о внутренний цилиндр.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Основы теории формирования отливки	6
1.1. Теория жидкого состояния расплавов	6
1.2. Температура плавления и плотность металлов и сплавов	7
1.3. Вязкость металлов и сплавов	12
1.4. Диффузия в металлических расплавах	20
1.5. Давление пара металлов	22
1.6. Электрическое сопротивление жидких металлов	24
1.7. Тепловые свойства жидких металлов	26
1.8. Поверхностное натяжение и смачиваемость	31
Контрольные вопросы	35
Глава 2. Производство литых заготовок в песчаных формах	37
2.1. Способы производства отливок в песчаных формах	37
2.2. Схема построения технологического процесса изготовления отливки	42
2.3. Формовочные материалы	44
2.4. Формовочные и стержневые смеси	50
2.5. Литниковопитательная система и ее элементы	54
2.6. Методика расчета литниковых систем	57
2.7. Технология изготовления форм	62
2.8. Способы уплотнения формовочной смеси	66
2.9. Способы формовки	70
2.10. Технология изготовления стержней	75
2.11. Сборка и заливка отливок	80
2.12. Охлаждение отливок и выбивка форм	83
2.13. Обрубка и очистка отливок	86
Контрольные вопросы	88
Глава 3. Особенности производства отливок из серого чугуна	89
3.1. Общие сведения	89
3.2. Плавка чугуна	93
3.3. Особенности технологии изготовления отливок из ковкого чугуна	99
3.4. Особенности производства отливок из высокопрочного чугуна	103
3.5. Внепечная обработка металлических расплавов	108
3.6. Выбор модификатора для получения отливок из ВЧ модифицированием в форме	112
Контрольные вопросы	117
Глава 4. Производство стальных отливок	119
4.1. Конструкции стальных отливок и особенности проектирования литейной формы	119
4.2. Устройство и расчет литниковых систем	122
4.3. Виды прибылей стального литья	124
4.4. Особенности технологии формовки	129
4.5. Термообработка стальных отливок	131
4.6. Плавка и заливка стали	131
Контрольные вопросы	135

Глава 5. Производство отливок из сплавов цветных металлов	136
5.1. Отливки из медных сплавов	136
5.2. Особенности литья из алюминиевых сплавов	139
5.3. Отливки из магниевых сплавов	142
5.4. Отливки из тугоплавких сплавов	146
Контрольные вопросы	148
Глава 6. Специальные способы литья	149
6.1. Литьё в кокиль	149
6.2. Литьё по выплавляемым моделям	154
6.3. Литьё в оболочковые формы	167
6.4. Литьё под давлением	180
6.5. Центробежное литьё	197
6.6. Литьё по газифицируемым моделям	208
6.7. Кристаллизация под давлением и штамповка из расплава	218
6.8. Электрошлаковое литьё	221
Контрольные вопросы	225
Глава 7. Технологические основы производства художественных отливок	227
7.1. Разновидности художественных отливок и классификация	228
7.2. Очистка, обрубка и отделка отливок	234
7.3. Технологическая схема изготовления крупных бронзовых монументов	235
Контрольные вопросы	242
Глава 8. Контроль качества отливок	243
8.1. Организация и основные виды технического контроля	243
8.2. Методы контроля размерной точности отливок	245
8.3. Классификация дефектов	246
8.4. Поверхностное расширение формы и ужимины	253
8.5. Ситовидная пористость	254
Контрольные вопросы	256
Глава 9. Компьютерные технологии в литейном производстве	257
9.1. Анализ современного состояния автоматизированного проектирования в литейном производстве	257
9.2. Определение критериев описания отливки	272
9.2.1. Материал отливки	274
9.2.2. Критерии, характеризующие деталь	279
9.3. Разработка методов хранения данных и модели анализа	281
9.4. Формализации процесса проектирования БД	282
9.5. Структура базы данных «Отливка»	285
9.6. Структура справочной базы данных	289
9.7. Справочная база данных «Материалы»	293
9.8. Алгоритм принятия решения выбора оптимального способа литья	296
9.9. Пример определения оптимального способа литья	301
9.10. Автоматизированный выбор способа изготовления отливки	304
9.11. Программное обеспечение базы данных «Материалы»	312
Контрольные вопросы	319
Список литературы	320
Приложение. Исходный текст модуля определения оптимальности способов литья	321

Учебное издание

*Вальтер Александр Игоревич
Протопопов Александр Анатольевич*

ОСНОВЫ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Учебник

ISBN 978-5-9729-0363-4



Подписано в печать 08.04.2019
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».

Издательство «Инфра-Инженерия»
160011, г. Вологда, ул. Козленская, д. 63
Тел.: 8 (800) 250-66-01
E-mail: booking@infra-e.ru
<https://infra-e.ru>

Издательство приглашает
к сотрудничеству авторов
научно-технической литературы