

АНАЛИЗ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК

СОДЕРЖАНИЕ

	с.
1 Классификация литейных сплавов	1
2 Теория жидкого состояния	1
3 Влияние примесей и их удаление	2
4 Требования к литейным сплавам	3
5 Литейные свойства сплавов	4
6 Затвердевание отливок, их структура и качество	5

1 КЛАССИФИКАЦИЯ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ

Литейные сплавы классифицируются в зависимости от их состава, свойств, назначения. Сплавы на **основе железа** называют **черными**. К ним относят все разновидности чугунов и сталей. Остальные литейные сплавы на основе алюминия, магния, цинка, олова, свинца, меди, титана, молибдена, никеля, кобальта, бериллия и других металлов, в том числе и благородных (серебра, золота, платины), называют **цветными**.

Производство отливок из сплавов на железной основе занимает первое место по количеству; это объясняется не только хорошими свойствами этих сплавов, но и широким распространением рудных запасов. Производство отливок из цветных металлов занимает второе место, так как оно основано на переработке сравнительно бедных руд, требующих более трудоемких способов предварительного обогащения. Руды цветных металлов (за исключением алюминия) содержатся в земной коре в сравнительно небольших количествах и переработка их обходится дороже.

Для обеспечения требуемых эксплуатационных свойств литых деталей, например прочности, твердости, износостойкости, в сплавы в определенном количестве вводят специальные добавки, так называемые **легирующие компоненты**. По содержанию их сплавы делят на **низколегированные** (менее 2,5% легирующих компонентов по массе), **среднелегированные** (от 2,5 до 10%) и **высоколегированные** (свыше 10%).

2 ТЕОРИЯ ЖИДКОГО СОСТОЯНИЯ

Расплавленные металлы и сплавы составляют группу металлических жидкостей. Межчастичные связи в них возникают преимущественно вследствие взаимодействия положительных ионов со свободными электронами.

Жидкие чистые металлы отличаются относительно простым строением, однако их композиции – сплавы – в этом отношении исключительно сложны, что и определяет разнообразие их свойств. По своим свойствам и строению жидкости гораздо ближе стоят к твердым телам, чем к газам, особенно при температурах, близких к температуре кристаллизации. Такое заключение вытекает, в частности, из следующих экспериментальных фактов и многократно подтвержденных и дополненных впоследствии практикой.

1. При плавлении твердых тел относительное увеличение объема не превышает 10 %. Следовательно, средние расстояния между частицами вещества в процессе плавления почти не изменяются. В то же время при испарении они увеличиваются в десятки раз.

2. Скрытая теплота плавления бывает значительно меньше теплоты испарения, то есть силы взаимодействия между частицами испытывают сравнительно небольшое ослабление.

3. Теплоемкость тел почти не меняется при плавлении. Это говорит о сохранении характера теплового движения частиц, которые совершают колебания около временных положений равновесия. Получив в результате взаимодействия с соседями дополнительную энергию, частица скачкообразно меняет свою позицию. В жидкости частота таких скачков значительно выше, чем в твердом теле.

4. При достаточно малом времени воздействия нагрузки жидкость проявляет упругие свойства, обнаруживая даже подобие хрупкости.

5. Рентгеноструктурный анализ показывает, что при температурах, не слишком превышающих температуру плавления, расположение частиц в жидкости не беспорядочно, а весьма сходно с существующим в твердом кристаллическом теле. Однако в отличие от **кристаллических тел**, обладающих **дальним порядком**, основной характеристикой **структуры жидкости** является **ближний порядок**.

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.

Абсолютное большинство реальных металлических жидкостей – это взаимные растворы, или сплавы многих элементов, иначе говоря, многокомпонентные системы. При их изучении особое внимание уделяется степени

микронеоднородности, под которой подразумеваются различия в структуре ближнего порядка отдельных микрообъемов жидкости.

Структура, состав и технологические параметры жидких сплавов определяют и основные их свойства: плотность, вязкость, смачиваемость, диффузионные и тепловые процессы.

Состав, свойства и, следовательно, качество металлических расплавов зависят от режимов плавки. Знание физико-химических основ процесса плавки литейных сплавов и умение правильно определить режимы плавки позволяют получить расплав с требуемыми свойствами. Чтобы обеспечить высокое качество отливки необходимо знание физических процессов, происходящих при заливке и заполнении форм расплавом.

Гидравлические процессы в литейной форме зависят от свойств сплава и формы. Правильность расчетов всех полостей формы, скорости заполнения их расплавом зависит от точности выбора режимов работы каждого элемента в системе каналов и параметров физики течения расплава. Физико-химические процессы, происходящие на границе металл – форма определяют все основные дефекты в отливках. Умение управлять этими процессами, прогнозировать возможные виды взаимодействий позволяет литейщику разработать комплекс мер, обеспечивающих получение высококачественных литых изделий. Следует предупреждать возможные загрязнения сплавов продуктами взаимодействия с атмосферой, материалами футеровки печи, флюсами. При необходимости важно выбрать наиболее эффективный способ легирования, рафинирования, модифицирования расплавов. Кроме того, требуется обеспечить условия, при которых потери металла на испарение, окисление, шлакообразование были бы минимальными. Управлять процессами плавки сплавов, заливки форм и кристаллизации отливок можно только при условии знания гидравлических и теплообменных процессов в форме.

3 ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ И ИХ УДАЛЕНИЕ

Помимо специально вводимых в литейные сплавы компонентов в них обычно присутствуют постоянные примеси, наличие которых связано с особенностями металлургических процессов приготовления сплава и составом исходных металлургических материалов (руд, топлива, флюсов). Часто эти примеси (например, сера и фосфор в сталях) являются вредными и содержание их ограничивают.

Расплавленный сплав не является «прозрачной» жидкостью. В нем непременно присутствуют посторонние примеси: окислы, сульфиды, нитриды, газы, шлаковые включения, которые могут находиться в твердом, жидком или газообразном состоянии.

Чем сильнее нагреть жидкий сплав, тем больше примесей перейдет в растворенное состояние и тем физически более однородным станет образовавшийся раствор. Наоборот, при невысоком нагревании сплава, всего на несколько градусов выше температуры линии **ликвидуса**, в нем остается много не успевших раствориться остатков (например, графит в чугуне, карбиды в сталях и др.).

Физическая однородность сплава в жидком состоянии зависит от некоторых физических свойств, которые следует иметь в виду, приготавливая сплав, предназначенный для производства отливок (чем меньше величина частицы, чем меньше разность удельных весов жидкости и частиц примеси и чем больше вязкость жидкости, тем медленнее всплывают или тонут любые частицы примесей, находящиеся в жидком расплаве, тем менее физически однороден сплав).

Удаление нежелательных примесей из сплава в жидком состоянии называется **рафинированием**.

Существует несколько методов рафинирования. Так, например, рафинирование может быть произведено отстаиванием

Для быстрого и успешного рафинирования этим способом необходимо уменьшать вязкость жидкости (что может быть достигнуто повышением температуры), увеличивать радиус частиц, например, при помощи известных приемов коагуляции (сгущение – слипание коллоидных частиц при их столкновении), или сливания взвешенных частиц в сплаве, или изменять разность удельных весов. (Коагулянты – вещества, введение которых в жидкость, содержащую мелкие взвешенные частицы, вызывает их слипание и выпадение в осадок, т. е. коагуляцию.)

Растворенные в сплаве вредные примеси удаляются из него путем перевода в новые, не растворимые в данном сплаве химические соединения, например MnS и др.

Приготовление сплава для высококачественных отливок должно сопровождаться более или менее длительной выдержкой при рафинировании. Имеются, кроме того, методы ускоренного рафинирования сплавов, например, хлорирование алюминиевых сплавов.

Методы рафинирования сплавов изучаются в специальном курсе металлургии, но имеют прямое отношение и к металлургии литейного производства.

Основной задачей производства сплава для литья надо считать образование физически однородного жидкого сплава, лишенного шлаковых и газовых частиц, имеющего необходимый химический состав, требуемые механические свойства и заданное строение как в жидком, так и твердом состоянии. При охлаждении из перегретого раствора выпадают наиболее тугоплавкие растворенные примеси (например, карбиды) и выделяются газы.

Рафинирование считается успешным, если сплав становится физически максимально однородным к моменту начала кристаллизации. Газы и неметаллические включения, присутствующие в сплаве при температуре, соответствующей линии **ликвидуса**, в структурно свободном состоянии образуют самостоятельные фазы. На поверхностях фаз, в зависимости от изменения поверхностного натяжения и термодинамических свойств граничащих соседних веществ, происходят реакции обмена. Состав и свойства фаз при этом изменяются.

Сплав при охлаждении вступает как бы в новый период, который можно назвать периодом подготовки к кристаллизации. В процессе производства сплавов для высококачественного литья в сплавы иногда вводят в небольших количествах добавки, которые способны изменять состав фаз коллоидной величины и резко изменять

обычный ход кристаллизации сплава.

Введение специальных добавок в сплав с целью вмешательства в процесс кристаллизации называется модифицированием. К таким добавкам относятся некоторые ферросплавы — ферросилиций, силикокальций, алюминий, сплав АМS, магний, натрий, различные лигатуры и т. д.

Действие тех или иных добавок характерно только для данного сплава.

Литейные сплавы либо готовят из исходных компонентов (шихтовых материалов) непосредственно в литейном цехе, либо сплавы поступают с металлургических комбинатов в готовом виде и их только переплавляют перед заливкой в литейные формы.

Как в первом, так и во втором случае отдельные элементы в процессе плавки, входящие в состав литейного сплава, могут окисляться (угарать), улетучиваться при повышенных температурах (возгоняться), вступать в химическое взаимодействие с другими компонентами или с футеровкой печи и переходить в шлак.

Для восстановления требуемого состава сплава потери отдельных элементов в нем компенсируют, вводя в расплав специальные добавки (**лигатуры, ферросплавы**), приготовляемые на металлургических предприятиях.

Лигатуры представляют собой вспомогательные сплавы, используемые как для введения в расплав основного литейного сплава легирующих элементов, так и для компенсации их угара. Лигатуры содержат помимо легирующего элемента также и основной металл сплава, поэтому они легче и полнее усваиваются расплавом, чем чистый легирующий элемент. Применение лигатур становится особенно необходимым, если температуры плавления основного литейного сплава и легирующего элемента имеют значительную разницу. Наиболее широко применяют лигатуры из цветных металлов, например: медь — никель (15— 33% Ni), медь — алюминий (50% Al), медь — олово (50% Sn), алюминий — магний (до 10% Mg). При литье черных сплавов широко используют **ферросплавы**: ферросилиций (сплав железа с 13% и более кремния), ферромарганец, феррохром, ферровольфрам, ферромolibден и др. для введения легирующих элементов, а также для раскисления расплава. Используют также ферросплавы, состоящие из трех компонентов и более. К ферросплавам условно относят и некоторые сплавы, железо в которых содержится только в виде примеси, например силикоалюминий и силикокальций.

Раскисление, для которого часто используют ферросплавы, представляет собой процесс удаления из сплава кислорода, содержащегося в виде растворенных в металле оксидов (например, закиси железа FeO в стали). В процессе раскисления элементы, содержащиеся в ферросплавах, выполняют роль восстановителей: они соединяются с кислородом оксида, растворенного в расплаве, восстанавливают металл, а сами, окислившись, переходят в шлак. Так, раскисление стали кремнием, содержащимся в ферросилиции, происходит по реакции $2FeO + Si \rightarrow 2Fe + SiO_2$.

Очищение (рафинирование) расплава **раскислением** способствует значительному улучшению качества металла отливки, повышению его прочности и пластичности.

Ряд сплавов, так же как и металлов либо неметаллических материалов (солей и др.), используют в качестве **модификаторов**, которые при введении в литейный сплав в небольших количествах существенно влияют на его структуру и свойства, **например** измельчают зерно и способствуют повышению прочности металла. Так, для получения высокопрочного чугуна широко используют модифицирование магнием.

В настоящее время около 95% всех производимых отливок (по массе) составляют чугунные и стальные. Следует однако учитывать, что **из черных сплавов изготавливают** большое количество **крупных отливок**, масса которых доходит до нескольких десятков и даже сотен тонн, а **из сплавов цветных металлов** отливают в основном **мелкие и средние** детали массой от нескольких граммов до нескольких десятков и редко — до нескольких сотен килограммов. Поэтому, несмотря на то что в общем выпуске масса отливок из цветных сплавов составляет около 5%, номенклатура их, так же как и методы литья, весьма разнообразна, а количество значительно.

4 ТРЕБОВАНИЯ К ЛИТЕЙНЫМ СПЛАВАМ

Требования к каждому литейному сплаву специфичны, однако существует и ряд общих требований:

- состав сплава должен обеспечивать получение заданных свойств отливки (физических, химических, физико-химических, механических и др.);
- сплав должен обладать хорошими **литейными свойствами**: высокой жидкотекучестью, несклонностью к насыщению газами и к образованию неметаллических включений, малой и стабильной усадкой при затвердевании и охлаждении, несклонностью к ликвации и образованию внутренних напряжений и трещин в отливках;
- состав, свойства и структура сплава как в исходном состоянии, так и в готовой литой детали должны быть постоянными и не изменяться в процессе ее эксплуатации;
- сплав должен быть по возможности простым по составу, легко готовиться, не содержать токсичных компонентов, не выделять при плавке и заливке сильно загрязняющих окружающую среду продуктов;
- потери сплава при его приготовлении и в процессе литья должны быть минимальными;
- сплав должен быть технологичным не только в изготовлении отливок, но и на всех последующих операциях получения готовых деталей (при обработке резанием, сварке, пайке, термической, гальванической и других видах окончательной обработки);
- сплав должен быть экономичным: содержать по возможности меньшее количество дорогостоящих компонентов (быть экономно легируемым), иметь минимальные потери при переработке его отходов (литников, брака, сплесков).

Выполнить все перечисленные требования в большинстве случаев практически невозможно, поэтому **для решения определенных технических задач используют сплавы**, свойства которых отвечают какому-нибудь одному (основному) требованию, а остальные требования приобретают подчиненное ему значение. Так, для изготовления рабочих лопаток газотурбинного авиационного двигателя применяют сплавы на никелевой основе, обладающие хорошей прочностью при высоких температурах (800—1200°C), т. е. жаропрочные. Однако эти сплавы не отвечают

многим другим требованиям: они плохо обрабатываются резанием, образуют оксидные пленки, что вызывает необходимость ведения плавки и заливки форм в вакууме, имеют сложный состав (содержат до 10 легирующих компонентов), весьма дороги.

Необходимо отметить, что при выборе существующих или при создании новых литейных сплавов наряду с эксплуатационными свойствами большое значение приобретают литейные, обеспечивающие возможность получения качественных отливок при минимальных затратах труда, материальных средств, энергии, металла и вспомогательных материалов.

5 ЛИТЕЙНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ

Литейными называют ряд свойств металлов и сплавов, определяющих их технологичность в литейных процессах, т. е. пригодность для получения из них отливок необходимой конфигурации, с высокими эксплуатационными свойствами, заданной размерной точностью и требуемым качеством поверхности. Литейные свойства проявляются как в расплавах, так и на всех стадиях их затвердевания и охлаждения. Важнейшими литейными свойствами сплавов являются **жидкотекучесть, усадка, склонность к образованию неметаллических включений, к поглощению газов, ликвации, склонность к образованию внутренних напряжений и трещин.**

Главным технологическим свойством жидкого сплава в литейном производстве является **жидкотекучесть**

Жидкотекучесть — способность металлов и сплавов в расплавленном состоянии заполнять литейную форму, четко воспроизводя контуры ее и поверхность (способность расплава свободно течь в литейной форме, заполняя ее и точно воспроизводя все контуры). При низкой жидкотекучести движение расплава в форме может прекратиться раньше, чем она будет заполнена. Это наиболее вероятно при изготовлении крупных тонкостенных отливок, особенно если сплав в форме быстро охлаждается (например, при литье в металлические или сырые песчаные формы).

Жидкотекучесть сказывается на заполняемости формы расплавом, четкости воспроизведения рельефа полости формы.

На жидкотекучесть оказывают влияние многие факторы, связанные со свойствами, состоянием и строением расплава:

- его природа,
- температура при заливке,
- фазовый состав,
- вязкость,
- поверхностное натяжение,
- теплоемкость и теплопроводность,
- наличие включений,
- газонасыщенность, степень окисленности,
- интервал кристаллизации,
- состояние и свойства формы (например, ее температура, теплофизические свойства, состояние поверхности, от материала стенок форм или от шероховатости, газотворность и газопроницаемость),
- условия заливки (конструкция и размеры литниковой системы, напор расплава, скорость заливки, характер движения потока и т. д.).

Более высокую жидкотекучесть имеют сплавы, затвердевающие с образованием **эвтектики**. У стали и чугуна жидкотекучесть уменьшается с увеличением содержания серы и повышается с возрастанием содержания фосфора и кремния. Перегрев сплава выше температуры плавления ($T_{пл}$) повышает его жидкотекучесть.

Для определения жидкотекучести предложены различные пробы, отливаемые в формах специальной конструкции. Наиболее распространены различные разновидности спиральных проб. Формы для отливки таких проб имеют протяженный спиральный канал, расположенный в горизонтальной плоскости. Поперечное сечение канала постоянно по всей длине и имеет обычно форму трапеции высотой 8 мм, шириной сверху 8 мм и внизу 7 мм. Одна из конструкций спиральной пробы представлена на **рис. 1**.

Жидкотекучесть оценивается в миллиметрах по длине отлитой спирали. Для удобства замеров в верхней части канала сделаны выступы, расстояния между которыми 50 мм.

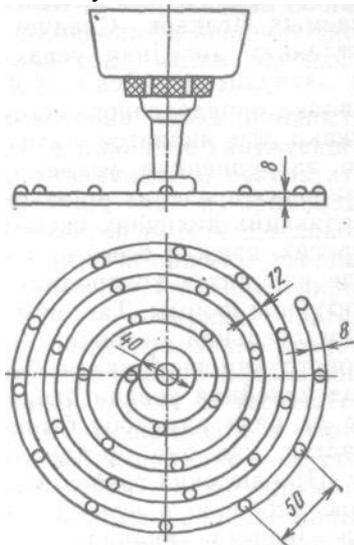


Рис. 1 Проба на жидкотекучесть

Различают три вида жидкотекучести.

Практическая жидкотекучесть определяется в условиях постоянной $T_{зал}$ (и, следовательно, неодинакового

перегрева) для всех сплавов данной группы.

Истинную жидкотекучесть определяют в условиях одинакового перегрева над температурой линии нулевой жидкотекучести. Однако положение этой линии трудно найти и определить.

Нулевая жидкотекучесть определяет состояние сплава, когда он перестает течь, что объясняется образованием достаточного количества твердой фазы, состоящей из первичных кристаллов. На величину жидкотекучести сильнее всего влияет перегрев заливаемого металла сверх температуры нулевой жидкотекучести, а также другие факторы, влияющие в большей или меньшей степени. Чем выше перегрев, тем больше жидкотекучесть. Но есть некоторый предел увеличения жидкотекучести; дальнейший, превышающий этот предел, перегрев сплава становится менее эффективным. Следовательно, для достижения определенной жидкотекучести каждого сплава устанавливается определенный интервал температур заливки литейных форм.

Следует отметить **влияние некоторых факторов**, определяющих природу и свойства сплава. Среди них большое значение имеет **химический состав**. Сплавы **эвтектического** состава и чистые металлы обладают наиболее высокой жидкотекучестью по сравнению со сплавами, образующими твердые растворы или химические соединения.

Сталь, по содержанию углерода далеко отстоящая от эвтектического состава, обладает наименьшей практической жидкотекучестью по сравнению с чугуном, близким к эвтектическому составу. Чугун малоуглеродистый менее жидкотекуч, чем обыкновенный чугун (серый). Латунь по сравнению с красной медью обладает большей жидкотекучестью и т. д. Это объясняется тем, что на жидкотекучесть оказывают влияние величина и форма зарождающихся кристаллов. При образовании крупных дендритов жидкотекучесть меньше, чем при образовании мельчайших кристаллов эвтектического типа или глобулей чистых металлов.

Модифицированный чугун обладает лучшей жидкотекучестью, чем чугун немодифицированный.

Нормальная жидкотекучесть обуславливает нормальные свойства отливок. Этот постулат не требует каких-либо доказательств, так как измерение жидкотекучести с помощью технологических проб дает представление не только о температуре сплава в момент заливки пробы, но и характеризует физическую пригодность сплава к разливу по формам. Действительно, если сплав **раскислен недостаточно** и не дегазирован, то бурное выделение газов в потоке воспрепятствует нормальному движению жидкости, независимо от температуры сплава. Если **рафинирование** сплава в печи не доведено до конца, то присутствие в металле неметаллических суспендированных (взвешенных) включений шлакового типа, пленок окислов и т. п. также понизит жидкотекучесть, и отливки будут засорены. Особенно резко понижается жидкотекучесть сплава, в котором присутствуют пленки окислов и нитридов, увеличивающие вязкость жидкости вследствие увеличения общей поверхности раздела различных фаз.

При добавке алюминия в ковш с чугуном жидкотекучесть понижается, по видимому вследствие образования твердых пленок глинозема и тугоплавких окислов.

Готовность плавки стали, чугуна или цветного металла к выпуску из печи точнее определяется по пробам на жидкотекучесть, чем по показаниям пирометра.

Технологическое свойство жидкотекучести зависит не только, от температуры и физического состояния металла в момент разлива по формам, но также от теплоотвода формы, от шероховатости и смачиваемости стенок каналов, по которым проходит жидкость, и, наконец, от характера атмосферы полости формы, куда поступает жидкий сплав. Жидкотекучесть сплава, заливаемого в металлическую форму, меньше, чем в песчаную, а заливаемого в сырую песчаную форму — меньше, чем в сухую и т. д.

Влияние характера движения жидкости на жидкотекучесть.

Характер движения жидкости по каналам литейной формы не может не влиять на жидкотекучесть. При ламинарном характере движения струйки в потоке двигаются параллельно одна другой. Скорость движения струек возле стенок канала близка к нулевой. Соприкосновение с холодными стенками канала вызывает немедленную кристаллизацию и затвердевание наружного кольцевого слоя. Живое сечение потока постепенно суживается, пока не наступит состояние нулевой жидкотекучести.

При вихревом движении частицы жидкости, ударясь под некоторым углом о холодную стенку канала, отражаются от нее и внедряются внутрь потока более нагретых частиц осевого слоя горячей жидкости.

Кольцевой слой затвердеет медленнее, чем в предыдущем случае, и живое сечение потока сохранится постоянным на более продолжительное время. Следовательно, за единицу времени через данное поперечное сечение канала пройдет больше жидкости, и длина отливой пробы на жидкотекучесть станет больше; иначе говоря, жидкотекучесть при турбулентном потоке будет более высокой.

Таким образом, можно прийти к выводу, что действительная жидкотекучесть тем больше, чем больше скорость движения и чем больше диаметр канала, а также чем меньше кинематическая вязкость жидкости.

Перенося этот вывод на заполнение литейной формы, а не формы для пробы, можно сделать другой **практический вывод**: при заливке тонкостенных отливок следует стремиться к достижению **турбулентного** движения, но только с одной целью — повышения жидкотекучести. **Ламинарное** движение, наоборот, будет способствовать получению недолива, не заполненных рельефов формы, например, ребер в крышке мотора мотоцикла с воздушным охлаждением, радиаторов для отопления, ребристых труб, тонкостенных предметов санитарии и гигиены — ванн, сливных баков и др. Для этого необходимо вести разливу с **большой скоростью и с большим перегревом сплава.**

При изготовлении форм для массивных отливок и заливке их, например, для копровых бойков, изложниц, станин прокатных станов, конусов доменной печи и т. п.; необходимо учитывать и другие факторы, хотя бы, например, то, что высокая жидкотекучесть сплава в этих случаях является уже вредной, потому что при большой высоте напора на нижних горизонтах полости формы развивается большое гидростатическое давление, вызывающее явление пригара, о котором сказано далее.

При затвердевании в литейной форме сталь с низкой жидкотекучестью дает физически неоднородную отливку, пронизанную газовыми раковинами или шлаковыми пленками. Пробы из этой стали показывают низкую прочность и особенно низкую пластичность. В ней увеличивается вероятность образования внутренних трещин и других скрытых пороков.

Влияние химических элементов на жидкотекучесть

Для **тонкостенных отливок** сталь требуется наиболее горячая и жидкотекучая. Содержание углерода в ней должно быть повышено. Для **массивных отливок**, наоборот, сталь должна быть перед заливкой холоднее, менее жидкотекучей, с несколько пониженным содержанием углерода, чтобы не увеличивать образования механического пригара из-за нагнетания жидкого сплава в межзерновые промежутки лицевой поверхности формы.

Чем больше углерода и кремния в доэвтектическом чугуна, чем ближе он к эвтектическому составу, тем выше его жидкотекучесть. Жидкотекучесть заметно уменьшается, если состав чугуна удаляется от эвтектического.

В заэвтектическом чугуна во время кристаллизации образуется структурно-свободный графит (спель) и жидкотекучесть стремится к нулевой при приближении к температуре ликвидус. В доэвтектическом чугуна с понижением содержания углерода интервал затвердевания (разность между $t_{лик}$ и $t_{сол}$) увеличивается, а жидкотекучесть падает вследствие дендритной кристаллизации. **Фосфор** образует в чугуна легкоплавкие фосфиды и потому жидкотекучесть металла увеличивается. Художественные отливки тончайшей работы и чугунная тонкостенная посуда отливаются из чугуна, содержащего фосфор в количестве от 0,5 до 1,5%.

Сера образует с железом и марганцем сложные сульфиды, богатые железом в маломарганцовистом чугуна (Fe, Mn) S и богатые марганцем в высокомарганцовистом чугуна (Mn, Fe) S. Первые более легкоплавкие сульфиды образуют самостоятельные вязкие фазы в жидком металле, жидкотекучесть сплава уменьшается. Внесение марганца в сплав повышает температуру плавления сульфидов, богатых марганцем, и жидкотекучесть возрастает, оставаясь более низкой в сравнении с малосернистым чугуна. Чугун, содержащий серу в количестве от 0,10 до 0,15%, плохо заполняет литейную форму и дает газовые раковины в отливках. Вполне справедливо сера считается одной из самых вредных примесей чугуна.

Примеси, способствующие росту первичных кристаллов аустенита, например хром, значительно понижают жидкотекучесть чугуна.

Медь и никель увеличивают жидкотекучесть; **алюминий, магний, кальций, вольфрам и ванадий** уменьшают ее. Жидкотекучесть белого маломарганцовистого чугуна при прочих равных условиях меньше, чем серого.

Жидкотекучесть зависит и от свойств формы. Между стенками формы и расплавом возникает трение и коэффициент трения будет тем выше, чем больше шероховатость стенки, и тем хуже жидкотекучесть. В песчаной форме, чем больше d зерна, тем меньше жидкотекучесть, чем окатаннее зерна, тем больше жидкотекучесть. Снижают шероховатость нанесением покрытий, созданием газовой прослойки на границе металл–форма. Однако если газов и паров образуется много, форма не успевает их отводить или сама дополнительно выделяет газы и пары, то в форме создается газовое противодавление движущемуся расплаву и жидкотекучесть ухудшается. В таких случаях необходимо устраивать выпоры на всех выступающих частях отливки.

Время заливки, и величину жидкотекучести можно регулировать температурой перегрева над $T_{лик}$, то есть регулированием $T_{зал}$. Однако использование перегрева ограничено, так как при значительном перегреве повышается газопоглощение, образуется грубозернистая структура, возникают усадочные дефекты. Поэтому недостающий перегрев металла можно компенсировать подогревом формы.

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.

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.

Величина, обратная вязкости, является мерой текучести, следовательно, чем меньше вязкость, тем больше текучесть. Вязкость зависит от удельной теплоемкости металла, от скрытой теплоты плавления и теплопередачи от металла к форме. В значительной степени на вязкость влияют включения, присутствующие в расплаве, при этом влияет 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 жидкотвердое состояние. Динамическая вязкость металлов в 2–7 раз превышает вязкость воды при комнатной температуре, а кинематическая вязкость во многих случаях бывает меньше, чем у воды. Это позволяет рассматривать жидкие металлы как относительно маловязкие жидкости, обладающие в изотермических условиях хорошей текучестью: $\varphi = 1 / \eta$.

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. 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 графитовой спели (структурно-

свободный графит). 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. Чем больше атомный объем металла, тем меньше его вязкость.

Поверхностное натяжение

Высокое поверхностное натяжение значительно облегчает разливку металлов. Оно препятствует вспениванию, затрудняет нежелательное разделение струи металла и препятствует проникновению металла в стенку песчаной формы. В то же время поверхностное натяжение препятствует затеканию металла в острые углы и кромки и делает их закругленными. Поверхностное натяжение является показателем состояния расплава и изменяется в зависимости от состава, температуры и степени засоренности его неметаллическими включениями. Металлы с высокой температурой плавления обладают, как правило, более высоким поверхностным натяжением, чем легкоплавкие металлы. Поверхностное натяжение при литье достигает еще более высоких значений вследствие неизбежного окисления металлов.

Усадка - свойство металлов и сплавов уменьшать объем при охлаждении в расплавленном состоянии, в процессе затвердевания и в затвердевшем состоянии при охлаждении до температуры окружающей среды. Различают **объемную** ($\epsilon_{об}$) и **линейную** ($\epsilon_{лин}$) усадки, выражаемые обычно в процентах:

$$\epsilon_{об} = [(V_{\phi} - V_o) / V_{\phi}] \cdot 100\%;$$

$$\epsilon_{лин} = [(\ell_{\phi} - \ell_o) / \ell_{\phi}] \cdot 100\%$$

где V_{ϕ} и ℓ_{ϕ} - соответственно объем и контролируемый линейный размер полости формы;

V_o и ℓ_o - объем и контролируемый размер отливки, охлажденной до температуры окружающей среды.

Результатом объемной усадки являются усадочные раковины и поры в отливке, для предупреждения образования которых используют различные технологические приемы: применяют прибыли, направленное затвердевание, суспензионное литье, кристаллизацию под поршневым давлением и др. При суспензионном литье в поток расплава, заполняющего литейную форму, вводят металлический порошок. Замешанные в расплав твердые металлические частицы выравнивают температуру в наружных и внутренних слоях отливки, уменьшают усадку, являются многочисленными центрами зарождения кристаллов при затвердевании расплава, что приводит к получению отливок с равномерной по сечению мелкокристаллической структурой. Однако суспензионный метод из-за значительного снижения жидкотекучести расплава малоприменим для изготовления тонкостенных, сложных отливок при заливке форм под действием гравитационных сил (без дополнительного давления). С усадкой также связано возникновение напряжений, которые могут вызвать деформацию отливок и даже привести к образованию трещин.

Величина усадки зависит от химического состава и свойств сплава, температуры его заливки и т.д. **Небольшую линейную усадку** имеет серый чугун 0,8 – 1,2 %, алюминиевые сплавы – силумины 0,9 – 1,3 %. У стали и некоторых других сплавов линейная усадка достигает 1,8 – 2,2%.

Линейная усадка является одним из важнейших литейных свойств сплавов, учитываемых при проектировании технологического процесса литья, так как величиной ее во многом определяется размерная точность получаемых отливок. Следует учитывать, что в реальных отливках линейная усадка может протекать свободно и затрудненно. Если свободная линейная усадка для сплава определенного состава и конкретных условий заливки его является величиной достаточно постоянной, то затрудненная усадка может изменяться в весьма широких пределах в зависимости как от факторов, определяющих величину свободной усадки, так и от многих других, прежде всего от конструкции той части отливки, где находится контролируемый размер, и податливости литейной формы. Так, обмерами сложной по конфигурации стальной отливки, изготовленной из углеродистой конструкционной стали, было установлено, что в местах, где линейная усадка была сильно затруднена, величина ее на ряде размеров была близка к нулю, но в других частях, где она протекала свободно, достигала 2,5%.

При высоких требованиях к размерной точности отливок, особенно в условиях крупносерийного и массового производства, в начале по наиболее дешевой деревянной модельной оснастке изготавливают опытные партии отливок, обмерами их определяют линейную усадку для каждого из контролируемых размеров, после чего производят доводку модельной оснастки либо изготавливают новую, более точную (например, металлическую) для выпуска промышленных партий деталей. Это позволяет за счет повышения размерной точности отливок уменьшить припуски на их механическую обработку, сократить расход металла и трудоемкость изготовления деталей. При изготовлении штучных отливок или при выпуске их небольшими партиями оснастку изготавливают с учетом средних значений линейной усадки сплава, а неточности контролируемых размеров отливки компенсируют припуском на ее механическую обработку.

Ликвация — неоднородность химического состава литейного сплава в различных частях отливки, возникающая при ее затвердевании, из-за различной растворимости отдельных компонентов сплава в его жидкой и твердой фазах. Различают дендритную и зональную ликвацию. **Дендритная ликвация** — это химическая неоднородность, проявляющаяся в пределах одного дендрита — кристалла древовидной (ветвистой) формы. Причиной ее является так называемая избирательная кристаллизация, вследствие которой оси дендритов, растущие первыми, содержат меньше примесей, а затвердевающая позже между осями часть расплава обогащается этими примесями, что и приводит к неоднородности химического состава в различных частях каждого дендрита.

Зональная ликвация — химическая неоднородность в отдельных объемах отливки, т. е. различие химического состава в разных ее частях, возникающая в результате как избирательной кристаллизации, так и процессов перемещения ликвирующих элементов вместе с жидкой фазой из одной части отливки в другую при ее затвердевании. Так, более тяжелые примеси могут концентрироваться в нижней, а более легкие — в верхней частях отливки (ликвация

по плотности), легкоплавкие компоненты литейных сплавов, затвердевающие в последнюю очередь (при более низких температурах), оттесняются в среднюю часть стенки отливки, что приводит к образованию разновидности зональной ликвации — **осевой ликвации**. Эта ликвация называется также прямой, в отличие от обратной, при которой в центральной части тела отливки содержатся более тугоплавкие компоненты, а легкоплавкие при кристаллизации вытесняются на ее поверхность.

Ликвация приводит к неоднородности механических и других эксплуатационных свойств литых деталей, вызывает их преждевременный износ и разрушение. Дендритную ликвацию в большинстве случаев удается устранить термической обработкой отливок, при которой за счет диффузионных процессов происходит выравнивание химического состава в пределах каждого кристалла (дендрита). Однако устранить образовавшуюся в отливке зональную ликвацию практически невозможно, поэтому стремятся предупредить ее образование, создавая технологические конструкции отливок, с равномерной толщиной стенок и без массивных узлов, вводя в сплавы добавки, уменьшающие ликвацию, применяя ускоренное охлаждение отливок.

Заполняемость литейной формы

Заполняемость является более общим понятием, чем жидкотекучесть. Зависит она от жидкотекучести, от конструкции формы, ее размеров, расположения отдельных элементов, способа подвода металла и условий литья. Особенно важную роль играет заполняемость при заполнении тонких стенок толщиной менее 5 мм. При низком гидростатическом напоре в литнике образуется выпуклый мениск и металл не сразу может преодолеть поверхностное натяжение. При повышении H поверхностное натяжение преодолевается, металл стремительно затекает в форму. При выравнивании уровней металла в стояке и в форме движение замедляется и на переднем крае образуется корочка. При увеличении напора корочка может прорваться, и жидкий металл будет вытекать дальше в виде отдельных языков, однако в результате быстрого охлаждения и насыщенности кристалликами течение быстро прекращается.

Следовательно, чем тоньше стенка, тем больше должен быть перегрев металла.

Литниковая система должна обеспечить минимальные потери температуры и напора, то есть должна иметь минимум поворотов и изменений сечений каналов, минимальную длину и максимально разумное сечение элементов.

Взаимодействие с газами

Газы, адсорбируемые поверхностью металла в атомарном состоянии, диффундируют в металл и чем больше активная поверхность адсорбента, тем большим будет и количество диффундирующего газа.

В отличие от обычных жидкостей в твердых и жидких металлах растворимость газов с повышением температуры увеличивается. В некоторых случаях она уменьшается (водород в титане, цирконии, ванадии). Причем скорость растворения в жидких металлах бывает больше, чем в твердых. При движении каплями, струйками в газовой среде газа в металле их растворяется больше, чем при движении потока газа над металлом под слоем шлака. Турбулентный поток захватывает больше газа, чем ламинарный. Возможно **гомогенное** (в объеме жидкого сплава) зарождение газовых пузырьков, но, вероятнее, **гетерогенное** (на поверхностях раздела) их зарождение. Такими местами могут быть фронт кристаллизации, неметаллические включения, газовые образования, подина и стенки плавильного агрегата, стенки желоба ковша, формы и т.д. В образующийся пузырек из одного газа могут диффундировать другие газы. Достигнув определенного размера, пузырек всплывает.

Наиболее опасными в сплавах являются **водород, кислород и азот**.

Водород обладает высокой растворимостью и диффузионной подвижностью вследствие малого диаметра. В сплавах он составляет 70–90 % всего газосодержания. Источником являются водяные пары. При затвердевании металла выделяется большое количество водорода в свободном состоянии и образуется газовая пористость, причем давление в порах очень высокое. Водород снижает пластичность и вызывает водородную хрупкость, если он остается в твердом растворе внедрения (особенно для высокопрочных сталей и титановых сплавов).

Азот также обладает хорошей растворимостью и попадает из атмосферы при высоких температурах. В легированных сталях он образует стойкие нитриды со многими элементами (Ni, Mo, Cr и др.). С алюминием и магнием он образует нитриды, с медью он практически не взаимодействует. Участие азота в формировании газовой пористости сравнительно невелико.

Растворимость **кислорода** в твердых чистых металлах очень мала. Со всеми металлами он образует окислы, которые являются неметаллическими включениями и оценивать его следует с этих позиций.

Меры по снижению газосодержания можно разделить на 3 группы:

- 1) дегазацию шихтовых материалов, предупреждение поглощения газов во время плавки, при выпуске в ковш, заливке в формы и в процессе затвердевания отливки;
- 2) дегазацию жидкого металла перед заливкой, то есть вакуумирование сплава, фильтрацию, продувку инертными газами, ультразвуковую обработку;
- 3) предупреждение выделения газов из раствора в процессе кристаллизации отливки (например, повышенное до 4–5 атм давление над кристаллизующимся сплавом, аналогично действует ускоренное охлаждение).

6 ЗАТВЕРДЕВАНИЕ ОТЛИВОК, ИХ СТРУКТУРА И КАЧЕСТВО

Первичная кристаллизация металлов и сплавов

Кристаллизацией называют переход вещества из жидкого в твердое кристаллическое состояние. Процесс кристаллизации во многом предопределяет уровень технологических и эксплуатационных свойств литого металла. В ходе затвердевания в отливке появляются усадочные и газовые поры и раковины. Отливка испытывает линейную усадку. В ней возникает сложная схема пластических и упругих деформаций. Появляющиеся при этом напряжения могут вызвать разрушение и коробление отливки. Все эти явления в определенной степени влияют друг на друга и на весь процесс затвердевания.

Как видно, процесс затвердевания намного сложнее и многообразнее процесса кристаллизации.

Образование кристаллов при переходе металла из жидкого или газообразного состояния в твердое называется **первичной** кристаллизацией, а изменение формы кристаллов в твердом состоянии – **вторичной**. От первичной кристаллизации зависит и вторичная, поэтому она определяет свойства готовой отливки. Для образования кристаллов из расплава необходим зародыш, или центр кристаллизации. Различают **два способа** образования зародышей: **гомогенный и гетерогенный**. По мере приближения температуры расплава к точке кристаллизации устойчивость и продолжительность «жизни» их повышается, а при определенной температуре они приобретают полную устойчивость и становятся центрами кристаллизации. Происходит спонтанная кристаллизация, и кристаллы начинают расти на кластерах (устойчивые образования или частицы). Такой тип зарождения кристаллов называется **гомогенным**.

При **гетерогенном** образовании зародышей кристаллы растут на инородных зародышах (различных включениях в расплаве). Для начала кристаллизации необходимо уменьшить свободную энергию, то есть переохладить расплав.

Процессы формирования структуры в отливках

Процесс формирования структуры в реальных отливках зависит от многих факторов, которые определяются свойствами каждого конкретного сплава, формой и конструкцией отливки. На затвердевание влияют теплофизические свойства сплава и формы, температура заливки сплава и формы перед заливкой, металлоемкость формы и средняя толщина стенки отливки.

Начинается кристаллизация всегда у стенок формы по гетерогенному типу. Величина структурных зон в отливке, от которой зависят эксплуатационные свойства готовой литой детали, зависит от технологических процессов по регулированию кристаллизационных процессов. После выпуска металла из плавильной печи в ковш при температуре t_k в течение времени T_k металл выдерживается и охлаждается в ковше. (рис. 2 а) Это необходимо, чтобы доставить ковш от участка плавки к месту заливки форм, а также произвести ковшовые металлургические операции (добавка легирующих и модификаторов для получения заданной структуры и свойств литого металла, **рафинирование жидкого металла путем продувки инертными газами**, обработки специальными шлаками, вакуумирование, фильтрование через кусковые или сетчатые фильтры и т.д.). По достижении требуемой температуры заливки $t_{зал}$ производится заливка металла в форму. С этого момента и до момента выбивки T_b (извлечение из формы) металл охлаждается в форме (рис. 2, б), отдавая ей свою теплоту перегрева $\Delta t_{пер}$ над ликвидусом, теплоту затвердевания в интервале **ликвидус–солидус** $\Delta t_{инт}$, а затем теплоту охлаждения в α -твердом состоянии от солидуса t_c до температуры фазового превращения $t_{пр}$ и в $(\alpha + \beta)$ -состоянии до выбивки из формы. Дальнейшее охлаждение отливки происходит на воздухе.

За время T_b охлаждения металла в форме от $t_{зал}$ до t_b последовательно происходит ряд процессов, определяющих качество отливки:

- течение металла при заполнении полости формы и внутри затвердевающей отливки;
- кристаллизация металла, то есть переход из жидкого состояния в твердое с образованием центров кристаллизации, рост которых приводит к формированию литой структуры;
- выделение растворенных в металле газов при понижении температуры расплава и в процессе его затвердевания с образованием крупных газовых пузырей (газовых раковин) и микроскопических пузырьков (пор);
- выделение неметаллических включений, их всплывание в жидком металле и удаление, а также застревание в объеме кристаллизующегося твердожидкого металла;
- ликвация примесей в результате избирательной кристаллизации и перемещения жидкой фазы, обогащенной примесями, по сечению отливки с образованием макроскопической (зональной) и микроскопической (дендритной) ликвации;
- объемная усадка (сокращение объема) металла при понижении температуры и фазовом переходе с образованием концентрированных усадочных раковин и рассеянной усадочной пористости;
- линейная усадка (сокращение наружных размеров) отливки, вызывающая появление деформаций, напряжений, коробления и трещин. Перечисленные процессы, включающие сложный комплекс взаимосвязанных физических явлений теплообмена, гидродинамики, диффузии, фильтрации и так далее. При нерациональной технологии изготовления отливки приводят к появлению многообразных дефектов. Литейные сплавы всегда кристаллизуются в интервале температур, их область затвердевания располагается между изотермическими поверхностями в отливке с температурами ликвидуса и солидуса (рис. 3).

Область затвердевания состоит из *твердожидкой* зоны (скелет из твердой фазы и включения жидкой фазы) и *жидкотвердой* зоны (жидкость с включениями разрозненных выделений твердой фазы).

Если из незатвердевшей отливки вылить жидкую фазу, то с ней удалится жидко-твердая зона. Поэтому граница между двумя зонами области называется *выливаемостью*. В твердожидкой зоне выделяется участок, в котором жидкая фаза разобрана растущими кристаллами и не может подпитываться по микроканалам. Граница этого участка – граница питания. На диаграмме состояния она располагается несколько ниже границы выливаемости (нулевой жидкотекучести). Границы 1–5 меняются в зависимости от условий охлаждения и характера кристаллизации. Для компактных дендритов и округлых кристаллов успевает образоваться 50–70 % твердой фазы, а граница выливаемости сдвигается к солидусу. При образовании разветвленных дендритов твердый скелет образуется уже при 15–30 % твердой фазы, а граница выливаемости располагается ближе к ликвидусу.

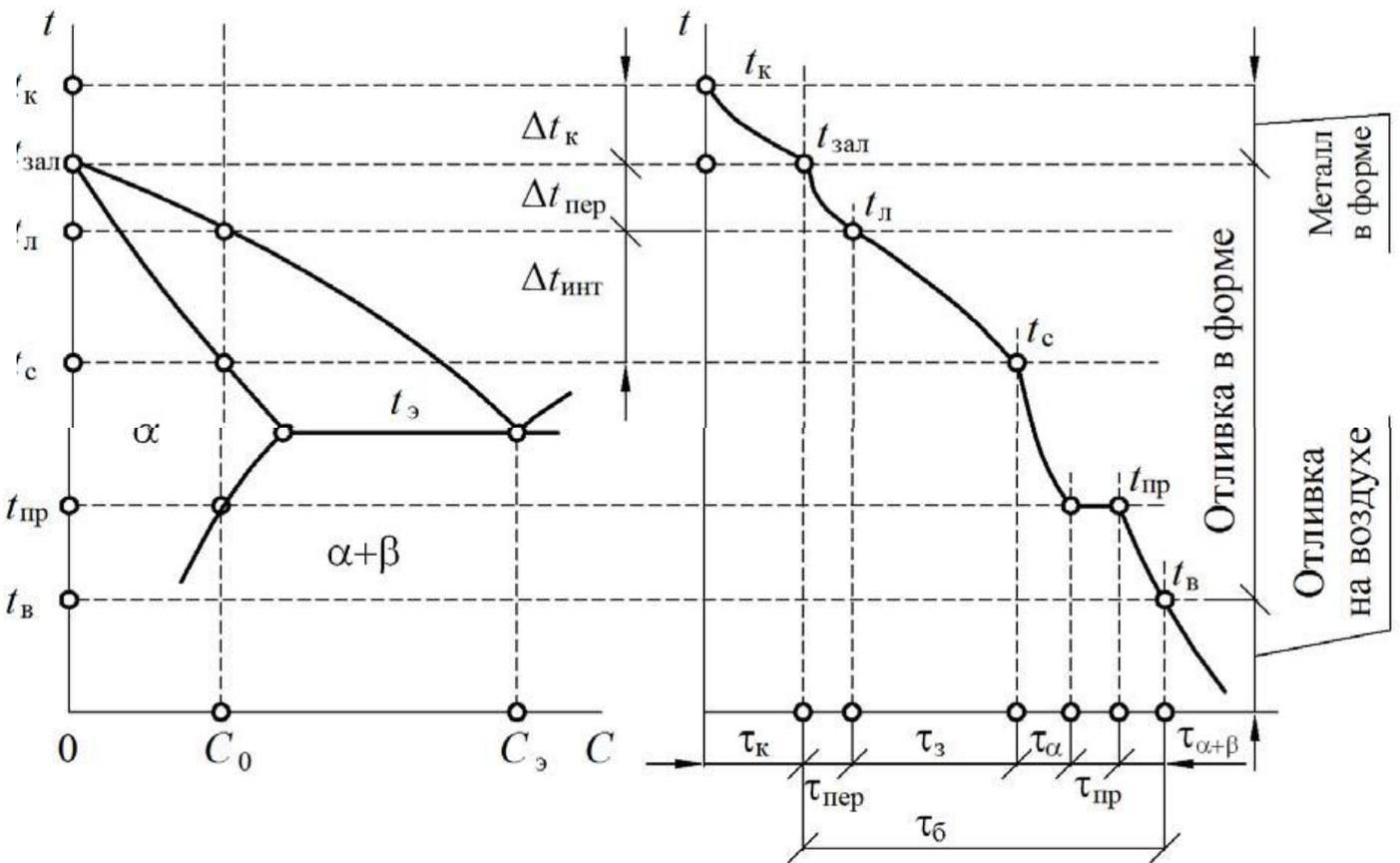


Рис. 2. Изменение температуры сплава состава C_0 в процессе формирования отливки по диаграмме состояния (а) и во времени (б) при охлаждении в заливочном ковше в форме и на воздухе

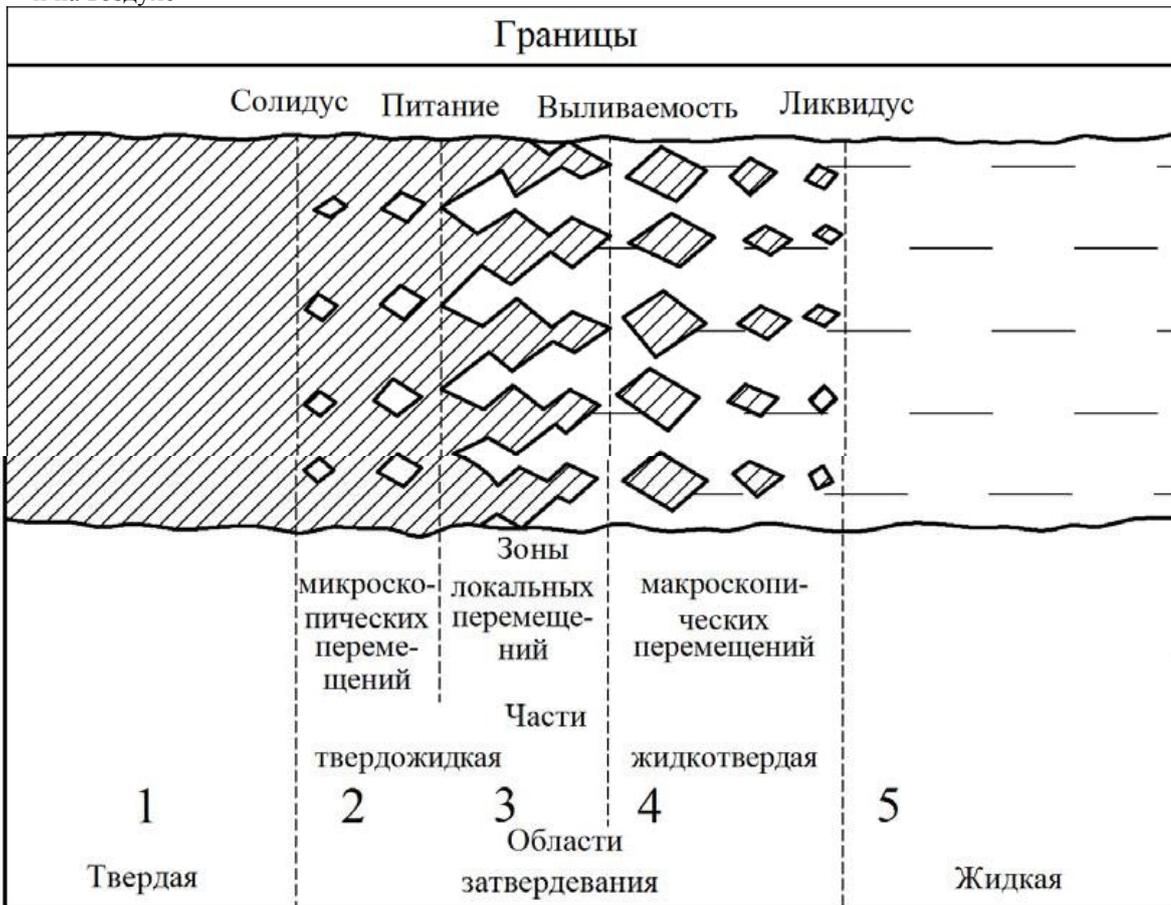


Рис. 3 Строение затвердевающей отливки

Механизм усадки и образования усадочных дефектов

При затвердевании объем металлов обычно сокращается, однако для галлия, сурьмы, висмута и лития затвердевания

сопровождаются не сжатием, а расширением

Формы кристаллических образований

На кристаллическое строение отливок могут оказывать влияние следующие условия:

- а) строение шихтовых материалов и условия плавки;
- б) температурный интервал начала и конца кристаллизации;
- в) природа шлакового покрова ванны в печи или в ковше, состав покрытия поверхностного слоя формы и состав печных газов, особенно при окончании плавки;
- г) природа малых добавок в сплав перед заливкой по формам, если такая добавка вносится;
- д) условия подвода металла к форме и охлаждение отливки и ее частей в литейной форме;
- е) встряхивание или перемещение сплава во время кристаллизации.

В зависимости от различных факторов, влияющих на первичную кристаллизацию, строение («узоры» — по П. П. Аносову) определяется величиной, видом и взаимным расположением кристаллов затвердевшего сплава.

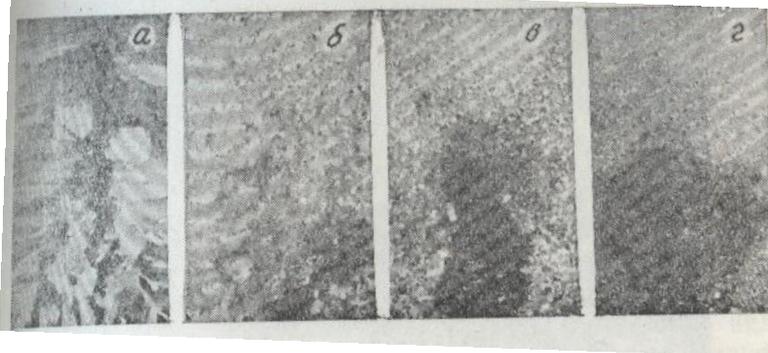


рис. 4

Сплав, вылитый в металлическую или земляную форму, образует три вида кристаллитов: столбчатые, или дендритные, кристаллиты с параллельным расположением больших осей

(рис. 4, а); точечные или шаровидные (глобулярные), кристаллиты более или менее округлой или шестигранной формы (рис. 4, б) и смешанные кристаллиты с безразличной ориентацией осей (рис. 4, в). В некоторых случаях, например, при выливании сплава в воду, образуются иглы — кристаллиты с вытянутыми осями.

Если столбчатое строение простирается насквозь до оси симметрии сечения, то такое строение называется транскристаллизационным (рис. 5), а явление как бы прорастания длинными кристаллами толщи слитка носит название транскристаллизации.



Рис. 5

Явление транскристаллизации цилиндрической отливки в поперечном разрезе

Наивысшую прочность и пластичность показывает шаровидное (глобулярное) строение, характеризующееся своей как бы однородностью или квазиизотропией; при таком строении анизотропные свойства каждого маленького кристаллита как бы поглощаются свойствами всего конгломерата, состоящего из различно ориентированных кристаллитов. Свойства отливки со смешанными кристаллитами уступают свойствам отливки, имеющей глобулярную структуру.

Худшими свойствами обладает металл, имеющий столбчатое крупнокристаллическое строение, и наихудшими свойствами - металл, имеющий грубое транскристаллизационное строение. В реальных условиях в металле отливки могут находиться почти все из перечисленных видов кристаллитов. Наружная очень тонкая зона может состоять из шаровидных зерен и даже игл, внутренний слой — из дендритов с параллельными, более или менее вытянутыми осями, а центральный слой — из равноосных, беспорядочно ориентированных дендритов.

Металл стальных и чугуновых отливок, полученных в песчаных формах, содержит главным образом зону смешанных кристаллов. Металл отливок из цветных сплавов, наоборот, состоит из кристаллов самой разнообразной формы; это разнообразие обуславливается составом сплава, интервалом затвердевания и

т. д. По величине кристаллитов различают **мелкозернистое** (рис. 4, г) и **крупнозернистое** (рис. 4, а) строение. Первое отличается более высокой прочностью и пластичностью вследствие более высокой структурной и физической однородности.

Влияние шихтовых материалов и условий плавки на первичную кристаллизацию

Строение и свойства отливок зависят не только от исходных шихтовых материалов, но и от условий плавки металла. Основные составные элементы шихтовых материалов почти целиком переходят в отливку.

Исследования показывают, что некоторые неметаллические включения шлакового типа, находясь в дисперсном состоянии, могут переходить в готовый металл из шихтовых материалов, почти без изменения химического состава. Вместе с тем, раскислением чугуна в ковше можно оказывать соответствующее воздействие на состав и количество как основных элементов, так и шлаковых включений. Так, на вальцеделательных заводах долгое время придерживались мнения, что без древесноугольного чугуна, обладающего наименьшим количеством неметаллических включений, нельзя выпускать прокатные валки высокого качества. Однако практика последних лет работы показывает, что хорошие по стойкости валки можно получать и без древесноугольного чугуна, например, в отражательной печи при надлежащих составе шлака и режиме плавки.

Появление газовой пористости в стальных или чугунных отливках зависит от состава и состояния шихты, температурного режима плавки и разлива металла, от раскисления металла, а также от внешних факторов, в частности, от атмосферных условий, которые могут изменять влажность формы и стержня.

Пористость газового происхождения и другие подобные явления легко устранимы при соблюдении известных условий.

УСЛОВИЯ плавки стали и чугуна считаются благоприятными в отношении кристаллического строения отливки при ведении плавки с интенсивным кипением ванны, а также тщательным проведением рафинирования и доводки в соответствии с существующими инструкциями.

Величина зерна регулируется присадкой алюминия, бора, магния и других примесей, вводимых в ковш после раскисления.

Влияние температурного интервала начала и конца кристаллизации на макростроение

Опытным путем определили, что в сплавах с узким температурным интервалом затвердевания образуются чаще всего столбчатые кристаллиты. К ним относятся чистые металлы, латуни и алюминиевые бронзы. Мягкая сталь, вылитая в изложницы, и белый чугун, отливаемый в металлические формы или при небольшой толщине стенок в земляные формы, получают развитую зону столбчатых кристаллов.

Отливки небольшой толщины (30—50 мм) иногда получают с грубой транскристаллизацией.

Если сплав, как это видно из диаграммы состояния, должен кристаллизоваться в широком температурном интервале, то кристаллизация его возникает в большом объеме и дендриты становятся ориентированными беспорядочно. В узком интервале отливка может кристаллизоваться только последовательно от поверхности, и оси дендритов располагаются перпендикулярно поверхности охлаждения. Получается строение столбчатое или транскристаллизационное.

Влияние примесей на первичную кристаллизацию

А. А. Байков первый установил влияние нерастворимых примесей на кристаллизацию жидкостей и предложил рассматривать жидкие сплавы как замутненные растворы. Карбидная, оксидная или силикатная и сульфидная «муть» может образовать как «собственные», так и «чужеродные» зародыши. Присутствие нерастворимых примесей в жидком сплаве почти целиком уничтожает способность реальных сплавов к переохлаждению. Если параметры решетки примесей близки к параметрам решетки основной массы сплава, то нерастворимая примесь становится активно участвующей в кристаллизации сплава. При перегреве до некоторой температуры примесь может дезактивироваться.

Зародыш при определенных благоприятных условиях начнет расти и превращаться в кристаллит, состоящий из основной металлической массы сплава.

Дезактивация (удаление) примеси при перегреве должна объясняться разрушением активного слоя на границе примеси при нагревании вещества выше точки плавления.

Кроме качественного подбора шихты и высокого перегрева, которые давно уже были известны металлургам как полезные мероприятия по повышению свойств сплавов, стали применять прямое вмешательство в кристаллизацию, основанное на химическом воздействии на состав неметаллических включений, всегда имеющих в том или ином сплаве. В цветной металлургии широко применяется рафинирование сплавов при помощи удаления неметаллических включений введением различных добавок в ванну и в ковш, например, введением хлористого марганца в алюминиевые сплавы и т. д.

Влияние модифицирования

Модифицированием называется обработка жидких сплавов малыми добавками перед заливкой формы с целью размельчения металлических зерен в процессе первичной кристаллизации. Сплав становится плотнее и однороднее, свойства его улучшаются.

Различают **модифицирование I** рода, когда добавка, растворяясь в сплаве, образует поверхностно-активные пленки на поверхности растущих кристаллитов, отделяет их от жидкого расплава и препятствует росту, и **модифицирование II** рода, когда вносятся добавки для искусственного увеличения количества зародышей кристаллитов, называемые «прививкой», инокуляцией или «затравкой». Структура сплава при модифицировании II рода имеет мелкозернистое строение, если соблюдаются все необходимые условия.

В настоящее время обработке малыми добавками с целью улучшения физических и химических свойств подвергаются почти все сплавы, применяемые в литейном производстве. Так, например, вводя в сталь феррохром, насыщенный азотом, получили модифицированный сплав с чрезвычайно мелкими первичными кристаллами благодаря образованию тугоплавких нитридов. Такой же эффект дает введение бора, алюминия и других элементов, которыми регулируется величина зерна стали.

Из практики производства цветных сплавов известно модифицирование силумина при помощи обработки сплава в ковше добавкой металлического натрия или натриевых солей.

Выделение газов в процессе кристаллизации

Степень растворимости водорода, окиси и других газов в жидких и твердых сплавах с понижением температуры и давления уменьшается. Из жидкого раствора газы выделяются в виде пузырьков. Крупные пузырьки, согласно закону Стокса, всплывают скорее, а мелкие могут застревать, образуя в отливках пористость (рыхлость) газового происхождения.

Газовая пористость является вторым после пористости усадочного происхождения недопустимым пороком металла в литом состоянии; отливки с таким пороком имеют пониженную герметичность и недостаточную механическую прочность. Выделение газов в твердом состоянии создает местные напряжения внутри отливок, делает их склонными к образованию холодных и горячих трещин. Газ выделяется из насыщенного жидкого раствора в свободном состоянии в виде вышедших на свободную поверхность ванны лопающихся пузырей (кипение ванны). Выделение газа во время кристаллизации способствует поднятию уровня металла в изложнице или в форме. Наиболее вредным газом является водород.

Водород попадает в сплав с шихтовыми материалами, особенно, когда в шихте есть забракованные отливки, влажная руда, ржавый скрап, окалина и др. Если не принять специальных мер во время плавки, водород остается в готовом металле. Переплавка стального скрапа без проведения процесса кипения (в дуговой электрической печи) и при низких температурах создает благоприятные условия для сохранения водорода, попавшего в ванну с шихтовыми материалами. Кипение ванны с присадкой влажной руды приводит к тем же отрицательным явлениям насыщения металла водородом.

Благоприятные условия для насыщения водородом готового и дегазированного металла при выпуске из печи и при разливке создаются в том случае, если недостаточно хорошо просушены жолоб и ковш. Вновь футерованный жолоб и ковш должны прогреваться докрасна, чтобы освободить кладку не только от механической, но и от коллоидной влаги.

При неправильном обращении с песчаными формами в процессе изготовления, сборки и заливки возможно образование газовой пористости, так как в металл проникают водяные пары, газообразные углеводороды от остатков органических веществ лицевого слоя формы, воздух из полости формы и т. д.

При изготовлении формы следует предусматривать такое расположение модели, чтобы не было воздушных мешков и газы и воздух могли свободно выходить через выпоры — особые каналы, специально устраиваемые для этого во всех верхних выступающих частях формы.

Тонкие выпоры называют «карандашными». Такие каналы предназначены только для прохода воздуха во время заливки формы: металл внутрь каналов проникнуть не может вследствие их небольшого диаметра.

В металлических формах в плоскости разъема делают тонкие «нитяные» каналы также для вентиляции полости формы. Скорость подачи металла в форму не должна быть больше скорости вытеснения нагретого воздуха. Это условие соблюдается при помощи определения скорости заполнения формы расчетным путем.

Водяные пары, образующиеся при заливке формы, могут явиться причиной не только образования газовой пористости в отливке, но и разрушения формы и даже взрыва с тяжелыми последствиями для окружающих. Главные меры предосторожности, обеспечивающие безопасность работы — тщательная сушка форм, хорошая механическая прочность их и устройство вентиляционных каналов от лицевого слоя формы.

Чтобы газы из формы не могли проникать через жидкую пленку отливки до момента образования твердой корки, требуется запечатывать поры на поверхности дисперсными частицами краски или сухой пыли (например, порошкообразным цементом, молотой кварцевой мукой, молотым графитом и т. п.). В формовочную смесь лицевого слоя формы для стальных отливок вводят до 30 % кварцевой муки. Однако следующие слои формы должны иметь достаточные проходы для газов и состояться из крупнозернистого песка. Для образования искусственных вентиляционных каналов форму накалывают заостренным куском проволоки.

Чтобы определить причину или вероятные источники образования газовой пористости в отливках, следует обращать внимание на характер образующихся раковин. Если пористость появляется чисто случайно, в одной или нескольких отливках от данной плавки, то это указывает на то, что причина появления дефекта связана с ненормальностью формы. Наоборот, если раковинами поражены все отливки, то дефект вызван плохим качеством (**газонасыщенностью**) металла. **Для борьбы с газовыми раковинами**, образующимися вследствие газонасыщенности металла, при получении отливок из цветных сплавов могут применяться различные меры. Например, иногда сплав оставляют в тигле до полного затвердевания, во время которого газы свободно выделяются от понижения степени растворимости; сплав «вымораживают», затем снова расплавляют, и он становится менее газонасыщенным. Наиболее эффективной мерой борьбы в этом случае являются заливка форм в автоклаве под давлением и плавка в вакууме.