

## **ЛЕКЦИЯ 5 *Кристаллизация металлов и строение металлического слитка***

- 1) Первичная кристаллизация.
- 2) Строение металлического слитка.
- 3) Полиморфные превращения.

## 1) Первичная кристаллизация

Переход металла из жидкого состояния в твердое (кристаллическое) называется *кристаллизацией*. Кристаллизация протекает в условиях, когда система переходит к термодинамически более устойчивому состоянию с меньшей свободной энергией или термодинамическим потенциалом  $F$ , т. е. когда свободная энергия кристалла меньше жидкой фазы. Если превращение происходит с небольшим изменением объема, то  $F = H - TS$ , где  $H$  — полная энергия системы;  $T$  — абсолютная температура;  $S$  — энтропия. Изменение свободной энергии жидкого и твердого состояний в зависимости от температуры показано на рисунке 1.

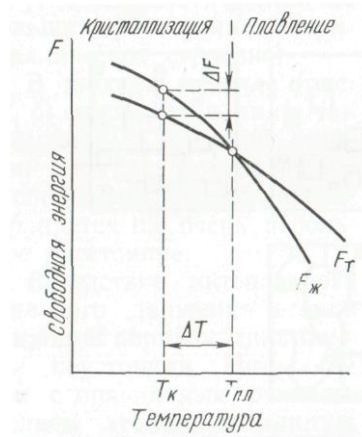


Рисунок 1 - Изменение свободной энергии  $F$  металла в жидком  $F_{ж}$  и твердом  $F_{т}$  состояниях в зависимости от температуры;  $T_{к}$  — температура кристаллизации;  $T_{пл}$  — температура плавления

Выше температуры  $T_{пл}$  более устойчив жидкий металл, имеющий меньший запас свободной энергии, а ниже этой температуры устойчив твердый металл. При температуре  $T_{пл}$  величины свободных энергий жидкого и твердого состояний равны. Температура  $T_{пл}$  соответствует равновесной температуре кристаллизации (или плавления) данного вещества, при которой обе фазы (жидкая и твердая) могут сосуществовать одновременно и притом бесконечно долго. Процесс кристаллизации при этой температуре еще не начинается. Он развивается в том случае, если созданы условия, при которых возникает разность свободных энергий вследствие меньшей свободной энергии твердого металла по сравнению с жидким.

Следовательно, процесс кристаллизации может протекать только при *переохлаждении* металла ниже равновесной температуры  $T_{пл}$ . Разность между температурами  $T_{пл}$  и  $T_{к}$  при которых может протекать процесс кристаллизации, носит название *степени переохлаждения*:  $\Delta T = T_{пл} - T_{к}$ .

Термические кривые, характеризующие процесс кристаллизации чистых металлов при охлаждении с разной скоростью, даны на рисунке 2. При очень медленном охлаждении степень переохлаждения невелика и процесс кристаллизации протекает при температуре, близкой к равновесной ( $v_1$ ). На термической кривой при температуре кристаллизации отмечается горизонтальная площадка (остановка в падении температуры), образование которой объясняется выделением скрытой теплоты кристаллизации, несмотря на отвод тепла при охлаждении.

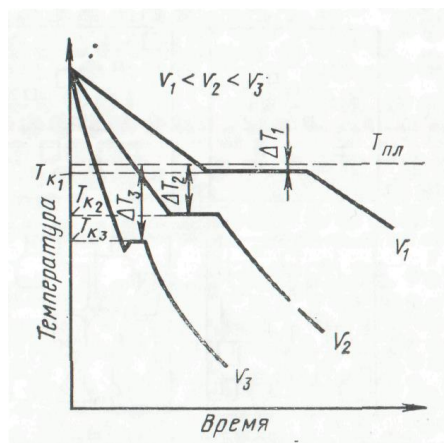


Рисунок 2 - Термические кривые охлаждения при кристаллизации чистых металлов с разной скоростью ( $v_1$  —  $v_3$ ).

С увеличением скорости охлаждения степень переохлаждения возрастает (кривые  $v_2$ ,  $v_3$ ) и процесс кристаллизации протекает при температурах, лежащих ниже равновесной температуры кристаллизации. Степень переохлаждения зависит от природы и чистоты металла. Чем чище жидкий металл, тем более он склонен к переохлаждению. При затвердевании очень чистых металлов степень переохлаждения  $\Delta T$  может быть очень велика. Так, при затвердевании Sn была достигнута  $\Delta T = 118$  °С, для Sb —  $\Delta T = 135$  °С \*. Однако чаще степень переохлаждения не превышает 10—30 °С.

Процесс кристаллизации, как впервые установил Д. К. Чернов, начинается с образования кристаллических зародышей (*центров кристаллизации*) и продолжается в процессе роста их числа и размеров, рисунок 3.

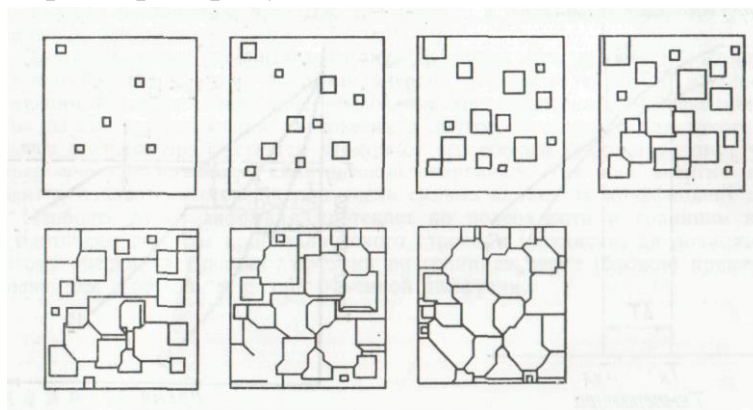


Рисунок 3 - Схема кристаллизации металлов.

При переохлаждении сплава ниже температуры  $T_{пл}$  во многих участках жидкого сплава образуются устойчивые, способные к росту, кристаллические зародыши, называемые *критическими*.

Пока образовавшиеся кристаллы растут свободно, они имеют более или менее правильную геометрическую форму. Однако при столкновении растущих кристаллов их правильная форма нарушается, так как в этих участках рост граней прекращается. Он продолжается только в тех направлениях, в которых есть свободный доступ для «питающей» жидкости. В результате растущие кристаллы, имеющие сначала геометрически правильную форму, после затвердевания получают неправильную

внешнюю форму; они называются *кристаллитами*, реже *зернами* (последний термин чаще употребляется для случая формирования объемов новых фаз в результате превращений в твердом состоянии).

*Самопроизвольное образование зародышевых центров.* Явления, протекающие в процессе кристаллизации, сложны и многообразны. Особенно трудно представить начальные стадии процесса, когда в жидкости возникает первый кристаллик, или *центр кристаллизации*.

Очевидно, что для выяснения условий появления этих центров надо ясно представить строение исходного жидкого металла. Схематические модели кристаллической и жидкой фаз представлены на рисунке 4.

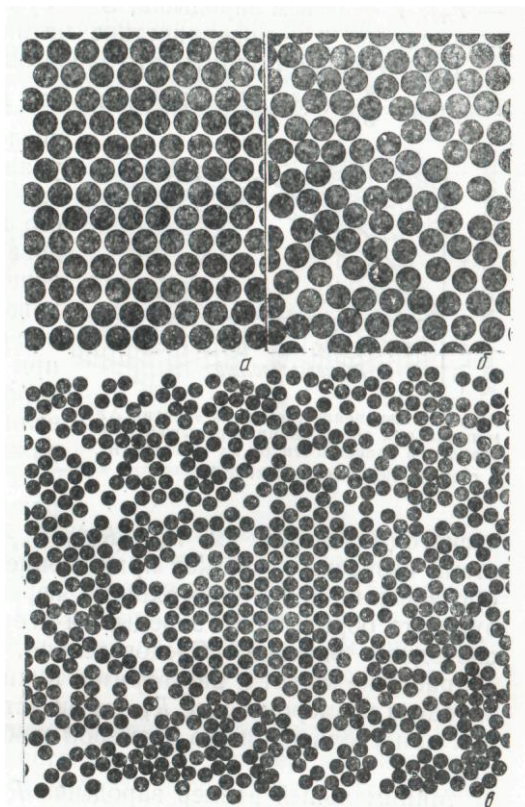


Рисунок 4 - Схемы кристаллической (а) и жидкой (б и в) фаз металла.

В жидком металле атомы не расположены хаотично, как в газообразном состоянии, и в то же время в их расположении нет той правильности, которая характерна для твердого кристаллического тела, когда атомы сохраняют постоянство межатомных расстояний и угловых соотношений на больших расстояниях (кристаллическое строение).

В жидком металле сохраняется лишь так называемый *ближний порядок*, когда упорядоченное расположение атомов распространяется на очень небольшое расстояние. Вследствие интенсивного теплового движения атомов ближний порядок динамически неустойчив. Микрообъемы с правильным расположением атомов, возникнув, могут существовать некоторое время, затем рассасываться и возникать вновь в другом элементарном объеме жидкости и т. д. С понижением температуры степень ближнего порядка и размер таких упорядоченных микрообъемов возрастают.

При температурах, близких к температуре плавления, в жидком металле возможно образование небольших группировок, в которых атомы упакованы так же, как в кристаллах. Такие дозародышевые группировки называется *фазовыми (или*

гетерофазными) флуктуациями. В чистом от примесей жидком металле наиболее крупные гетерофазные флуктуации могут превратиться в зародыши (центры кристаллизации). Зародыши, возникающие в процессе кристаллизации, могут быть различной величины. Рост зародыша возможен только при условии, если он достиг определенной величины, начиная с которой его рост ведет к уменьшению свободной энергии. В процессе кристаллизации свободная энергия системы, с одной стороны, уменьшается на  $\Delta F_{об} = V\Delta f$  вследствие перехода некоторого объема жидкого металла в твердый, а с другой стороны, возрастает в результате образования поверхности раздела с избыточной поверхностной энергией, равной  $\Delta F_{нов} = S\sigma$ . Общее изменение свободной энергии можно определить из следующего выражения:

$$\Delta F = -\Delta F_{об} + \Delta F_{нов}, \text{ или } \Delta F = -V\Delta f + S\sigma,$$

где  $\Delta f$  — разность объемных свободных энергий жидкого и твердого металлов ( $F_{жс} - F_m$ );  $V$  — объем зародыша;  $S$  — суммарная величина поверхности кристаллов;  $\sigma$  — поверхностное натяжение.

Если условно принять, что зародыш имеет сферическую форму, то

$$\Delta F = -4/3\pi R^3 \Delta f + 4\pi R^2 m\sigma,$$

где  $R$  — радиус зародыша;  $m$  — число зародышей.

Как видно из уравнения, чем меньше величина зародыша, тем больше отношение его поверхности к объему, а следовательно, тем большая часть от общей энергии приходится на поверхностную энергию. Изменение свободной энергии металла  $\Delta F$  при образовании кристаллических зародышей в зависимости от их величины  $R$  и степени переохлаждения  $\Delta T$  показано на рисунке 5.

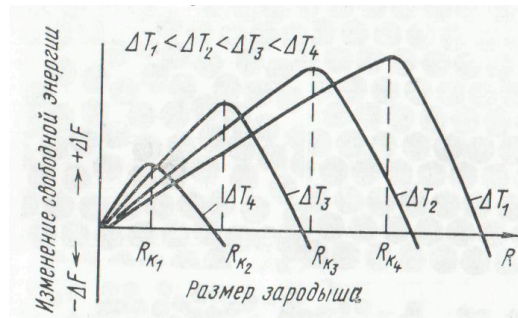


Рисунок 5 - Изменение свободной энергии  $\Delta F$  металла при образовании зародышей кристаллов в зависимости от их размера  $R_k$  и степени переохлаждения  $\Delta T$ .

При образовании зародыша размером меньше  $R_k$ , или критического (на рисунке 5, см.  $R_{к1}$ ,  $R_{к2}$ ,  $R_{к3}$ ,  $R_{ки}$ ), свободная энергия системы возрастает, так как приращение свободной энергии вследствие образования новой поверхности перекрывает ее уменьшение в результате образования зародышей твердого металла, т. е. объемной свободной энергии. Следовательно, зародыш размером меньше  $R_k$  расти не может и растворится в жидком металле. Если возникает зародыш размером более  $R_k$ , то он устойчив и способен к росту, так как при увеличении его размеров свободная энергия системы уменьшается.

Минимальный размер зародыша  $R_k$ , способного к росту при данных температурных условиях, называется *критическим размером зародыша* или *равновесным зародышем*:

$$R_k = 4\sigma/\Delta f \text{ (выражение справедливо для не слишком больших значений } \Delta T).$$

На образование критического зародыша затрачивается энергия (работа)  $(+\Delta F_k)$  равная одной трети его поверхностной энергии:  $\Delta F_k = 1/3 S\sigma$ .

Следовательно, уменьшение объемной свободной энергии при переходе атомов из жидкого состояния в твердое кристаллическое недостаточно для образования критического зародыша. Она лишь на две трети компенсирует энергетические затраты, связанные с образованием поверхности зародыша.

Образованию зародыша способствует неравномерное распределение энергии между атомами вещества. При каждой данной температуре большинство атомов имеет энергию, соответствующую некоторой средней величине. Однако в малых объемах вещества всегда существует некоторое количество атомов, которые имеют энергию, меньшую или большую средней. Эти случайные и временные отклонения энергии отдельных атомов или группировок атомов от среднего значения для данной температуры называют *флуктуациями энергии*.

Эти флуктуации способствуют получению энергии, требуемой для образования зародыша критического размера. *Зародыш, способный к росту, образуется там, где гетерофазные флуктуации в жидком металле размером не меньше критического обладают повышенной энергией, которая не меньше определенного уровня.*

При температуре, близкой к  $T_{пл}$ , размер критического зародыша должен быть очень велик и вероятность его образования мала. С увеличением степени переохлаждения  $\Delta T$  возрастает, а поверхностное натяжение на границе раздела фаз изменяется не значительно.

Следовательно, с увеличением степени переохлаждения (или с понижением температуры кристаллизации) размер критического зародыша уменьшается, тогда и работа, необходимая для его образования, будет меньше. Поэтому с увеличением степени переохлаждения  $\Delta T$ , когда к росту способны зародыши все меньшего размера, сильно возрастает число зародышей (центров) кристаллизации (ч.з.) или скорость образования этих зародышей (с.р.), рисунок 6.

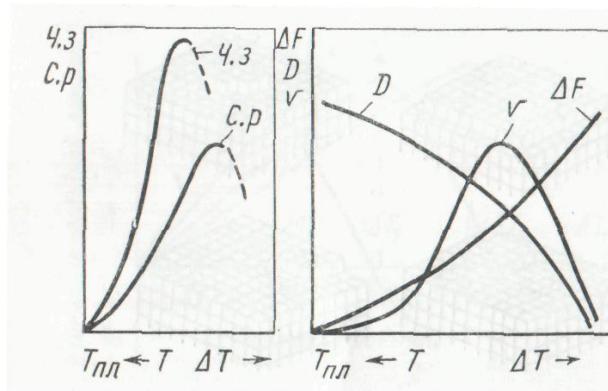


Рисунок 6 - Зависимость числа зародышей (ч.з.), средней скорости их роста (с.р.), изменения свободной энергии при кристаллизации  $\Delta F$ , средней скорости кристаллизации

$\nu$  и коэффициента диффузии  $D$  от степени переохлаждения  $\Delta T$ ;  $T_{пл}$  — равновесная температура плавления (кристаллизации)

Различают два элементарных процесса роста кристаллов.

1. *Образование двумерного зародыша (т. е. зародыша одноатомной толщины) на плоских гранях возникшего кристаллика.* Двумерный зародыш должен иметь размер не меньше критического. При меньшем размере зародыш не будет устойчив, так как вследствие образования дополнительной поверхности раздела свободная энергия системы возрастает.
2. *Рост двумерного зародыша путем поступления атомов из переохлажденной жидкости.* После образования на плоской грани двумерного зародыша дальнейший рост нового слоя протекает сравнительно легко, так как появляются участки, удобные для закрепления атомов, переходящих из жидкости.

*Число центров кристаллизации и скорость роста кристаллов.* При прочих равных условиях скорость процесса кристаллизации и строение металла после затвердения зависят от числа зародышей ч.з. (центров кристаллизации), возникающих в единицу времени и в единице объема, т. е. от скорости образования зародышей ( $1/\text{см}^3 \cdot \text{с}$ ); скорости роста (с.р.) зародышей или скорости увеличения линейных размеров растущего кристалла в единицу времени (мм/с). Чем больше скорость образования зародышей и чем больше скорость их роста, тем быстрее протекает процесс кристаллизации. При равновесной температуре кристаллизации ( $T_{пл}$ ) число зародышей и скорость роста равны нулю, поэтому кристаллизации не происходит. При увеличении степени переохлаждения скорость образования зародышей и скорость их роста возрастают, при определенной степени переохлаждения достигают максимума, после чего снижаются.

*Величина зерна.* Чем больше скорость образования зародышей и меньше скорость их роста, тем меньше размер кристалла, выросшего из одного зародыша (зерно), и следовательно, более мелкозернистой будет структура металла.

Величина зерна находится в следующей зависимости от числа зародышей (или скорости их образования) и скорости роста:  $d = 1,1 (\text{с.р./ч. з})^{3/4}$ .

При небольшой степени переохлаждения  $\Delta T$  (малой скорости охлаждения) число зародышей мало. В этих условиях будет получено крупное зерно. С увеличением степени переохлаждения скорость образования зародышей возрастает и размер зерна в затвердевшем металле уменьшается.

Размер зерна металла сильно влияет на его механические свойства, особенно на вязкость, которая значительно выше у металлов с мелким зерном.

*Гетерогенное образование зародышей.* Образование зародышей в жидком металле по описанному механизму называется *самопроизвольным (или спонтанным)*. Самопроизвольное образование зародышей на основе фазовых и энергетических флуктуации может происходить только в высокочистом жидком металле (гомогенное затвердение).

В технических металлах всегда присутствует большое количество различных примесей (окислов, неметаллических включений и т. д.), которые при определенных условиях облегчают образование зародышей; эти условия следующие:

1) примесь должна иметь более высокую температуру плавления, чем основной металл;  
2) поверхностное натяжение на границе раздела между посторонним включением и зародышем ( $\sigma_1$ ) должно быть меньше поверхностного натяжения на границе раздела между возникающим зародышем металла и жидким металлом ( $\sigma_2$ ). Установлено, что  $\sigma_1$  может быть меньше  $\sigma_2$  лишь и в том случае, когда кристаллические решетки примеси и кристаллизующегося металла одинаковы (так называемые изоморфные примеси) и параметры сопрягающихся решеток примеси и кристаллизующегося вещества примерно одинаковы (различие не превышает 9 %).

Примеси, удовлетворяющие этим требованиям, обладают естественной активностью.

Чем больше примесей, тем больше центров кристаллизации, тем мельче получается зерно. Такое образование зародышей называют *гетерогенным*.

Процесс кристаллизации обычно начинается от стенок формы, которые играют ту же роль, что и включения.

Если неизоморфные примеси предварительно находились в контакте с кристаллами данного вещества, то строение их поверхностного слоя изменяется, приспособляясь к строению кристалла. Такой процесс называют *активацией примесей*. На активированной примеси могут адсорбироваться атомы кристаллизующегося металла.

Растворенные (а не взвешенные) в жидком металле примеси также могут измельчать зерно и изменять его форму. В этом случае примеси при затвердевании осаждаются в виде тонкого слоя на поверхности растущего кристалла, что приводит к уменьшению поверхностной энергии. Такие примеси называют *поверхностно-активными*.

*Модифицирование* — использование специально вводимых в жидкий металл примесей (модификаторов) для получения мелкого зерна по описанному выше механизму. Эти примеси, практически не изменяя химического состава сплава, вызывают при кристаллизации измельчение зерна, и в итоге улучшение механических свойств. Так, при модифицировании магниевых сплавов зерно уменьшается от 200—300 до 10—20 мкм. При литье слитков и фасонных отливок модифицирование чаще проводится введением в расплав добавок, которые образуют тугоплавкие соединения (карбиды, нитриды, оксиды), кристаллизующиеся в первую очередь. Выделяясь в виде мельчайших частиц, эти соединения служат зародышами образующихся при затвердевании кристаллов. При модифицировании алюминиевых сплавов в качестве модификаторов применяют Na, Ti, V, Zr; магниевых сплавов — магнезит, мел, карбиды Al и Ca для стали Al, V, Ti. Бор используют в качестве поверхностно-активного модификатора для некоторых никелевых и железных сплавов, а магний — для чугуна.

### 3. Строение слитка

Кристаллы, образующиеся в процессе затвердевания металла, могут иметь различную форму в зависимости от скорости охлаждения, характера и количества примесей. Чаще в процессе кристаллизации образуются разветвленные, или древовидные, кристаллы,



получившие название *дендритов*, рисунок 7. При образовании кристаллов их развитие идет в основном в направлении, перпендикулярном плоскостям с максимальной плотностью упаковки атомов. Это приводит к тому, что первоначально образуются длинные ветви, так называемые оси первого порядка (*I* — главные оси дендрита). Одновременно с удлинением осей первого порядка на их ребрах зарождаются и растут перпендикулярные к ним такие же ветви второго порядка (*II*). В свою очередь на осях второго порядка зарождаются и растут оси третьего порядка (*III*). В итоге образуются кристаллы в форме дендритов.

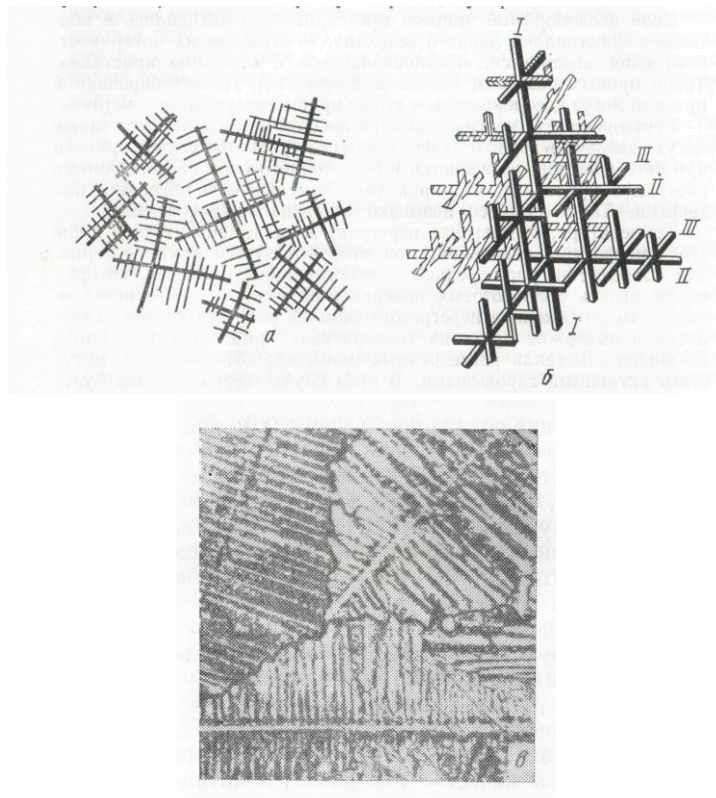


Рисунок 7 - Дендритная кристаллизация: *а* — схема дендритного кристалла; *б* — схема его роста; *в* — дендриты на поверхности слитка свинца x 200.

Кристаллы дендритной формы иногда можно видеть непосредственно на поверхности слитка в виде характерного рельефа или на поверхности усадочной раковины в местах недостаточного подвода жидкого металла. Чаще дендритное строение выявляется только после специального травления макрошлифов. Поскольку все промежутки между ветвями дендритов заполнены, обычно видны только места стыков дендритов в виде границ зерен. Правильная форма дендритов искажается в результате столкновения и срастания частиц на поздних стадиях процесса кристаллизации. Ветви дендритов разделены очень тонкими прослойками нерастворимых в жидком и особенно в твердом состоянии примесей и мельчайшими полостями и порами, возникшими в результате уменьшения объема при переходе металла из жидкого состояния в твердое. Следовательно, по механизму образования зерна металла представляют собой в основном дендритные кристаллы, выросшие из одного зародыша и имеющие одинаковую ориентацию кристаллической решетки. В зависимости от скорости охлаждения жидкого металла, зерна могут иметь равноосную (глобулярную) и столбчатую (вытянутую) форму.

В слитке металла можно различить три зоны с различной структурой, рисунок 8. Кристаллизация жидкого металла начинается у поверхности формы, которая более холодная и происходит вначале преимущественно в примыкающем к поверхности ее тонком слое сильно переохлажденной жидкости. Вследствие большой скорости охлаждения это приводит к образованию на поверхности слитка очень узкой зоны (1) сравнительно мелких равноосных кристаллитов.

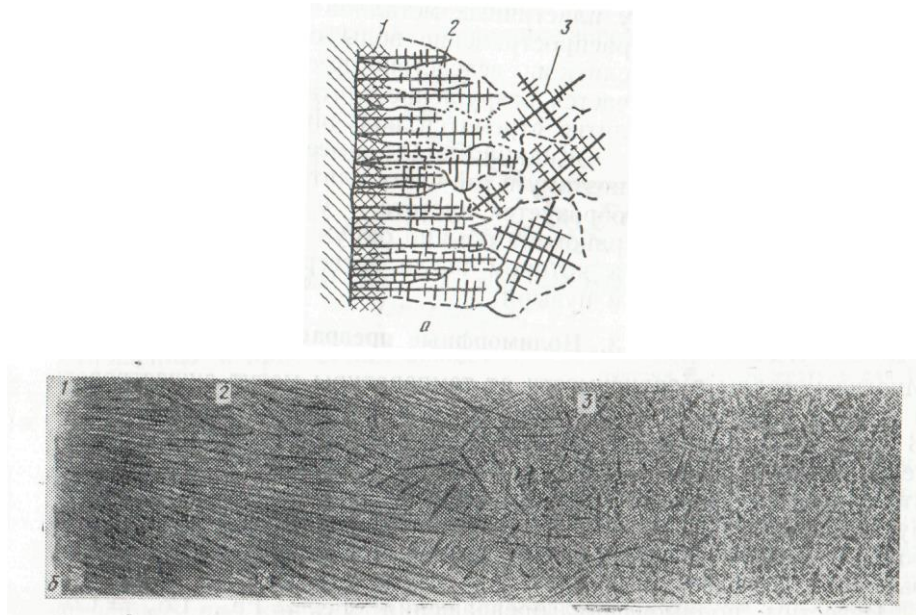


Рисунок 8 – Схема строения (а) и микроструктура стального слитка (б).

За зоной 1 вглубь слитка расположена зона 2 удлиненных дендритных кристаллитов (зона транскристаллизации). Рост этих кристаллитов происходит в направлении отвода тепла, т. е. нормально к стенкам изложницы. Последовательный рост дендритов от стенки изложницы обеспечивается продвижением вглубь расплава ветвей первого порядка и их разветвлением.

В случае сильного перегрева металла, быстрого охлаждения, высокой температуры литья и спокойного заполнения формы зона удлиненных дендритных кристаллов может полностью заполнить весь объем слитка. При низкой температуре литья, очень медленном охлаждении (например, в срединных слоях крупных отливок) создаются условия для возникновения зародышей кристаллов в средней части слитка. Это приводит к образованию во внутренней части отливки структурной зоны 3, состоящей из равноосных, различно ориентированных дендритных кристаллитов. Размеры их зависят от степени перегрева жидкого металла, скорости охлаждения, наличия примесей и др.

Находящиеся в жидком металле тугоплавкие частицы способствуют развитию зоны мелких равноосных кристаллитов.

Зона столбчатых кристаллов обладает высокой плотностью, так как в ней почти нет газовых пузырей и раковин. Однако в участках стыка столбчатых кристаллитов, особенно растущих от разных поверхностей, металл имеет пониженную прочность, и при последующей обработке давлением (ковке, прокатке и т. д.) в них могут возникнуть трещины. Поэтому для сравнительно малопластичных металлов, в том числе и для стали, развитие столбчатых кристаллитов нежелательно. Наоборот, для получения более

плотного слитка у пластичных металлов (например, меди и ее сплавов) желательное распространение зоны столбчатых кристаллитов по всему объему слитков; вследствие высокой пластичности таких сплавов исключается разрушение слитка при обработке давлением. При фасонном литье стремятся получить мелкозернистую равноосную структуру.

Жидкий металл имеет больший удельный объем, чем твердый; поэтому в той части слитка, которая застывает в последнюю очередь, образуется пустота — *усадочная раковина*. Усадочная раковина обычно окружена наиболее загрязненной частью металла, в котором после затвердевания образуются микро- и макропоры и пузыри.

### 3) Полиморфные превращения

Полиморфизм (от греч. *polymorphos* — многообразный) — способность некоторых веществ существовать в нескольких кристаллических состояниях с различной структурой. Такие состояния, представляющие собой термодинамические фазы, называют *полиморфными модификациями* и в соответствии с возрастанием температуры их существования обозначают буквами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и т. д.

Полиморфизм свойствен простым и сложным веществам. Частным случаем его является *аллотропия* — существование химических элементов в виде двух или более простых веществ. Например, известны три аллотропические модификации углерода — графит, алмаз, фуллерен.

Стабильность модификаций при данных температуре и давлении определяется величиной их свободной энергии. Более стабильна полиморфная модификация с наименьшей энергией, рисунок 9. Это может быть достигнуто либо за счет низкой энтальпии  $H$ , либо большего значения энтропии  $S$  кристаллов.

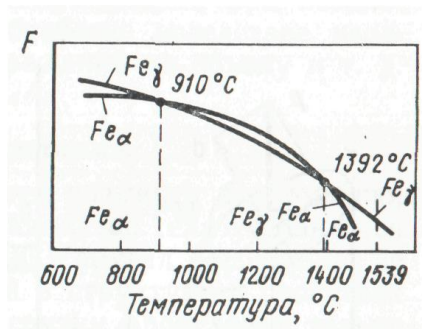


Рисунок 9 - Зависимость свободной энергии  $F$  от температуры для  $Fe_\alpha$  и  $Fe_\gamma$ .

В металлических кристаллах структуры ГПУ имеют меньшую энтальпию и устойчивы при низких температурах. Структура ОЦК имеет большую энтропию, чем ГПУ, и устойчива при повышенных температурах. Стабильность модификаций может изменяться в результате изменения типа связи между атомами. Например, при низких температурах более устойчива модификация  $Sn_\alpha$  с ковалентным типом связи, а при повышении температуры она превращается в  $Sn_\beta$  с металлической связью.

Области существования полиморфных модификаций и температуры их перехода определяются термодинамическим состоянием кристаллизующейся системы. Переход менее стабильной модификации в более устойчивую связан с преодолением

энергетического барьера посредством тепловых флуктуации. Если последние незначительны, полиморфная модификация существует неограниченно долгое время. Обнаружены полиморфные модификации ряда металлов:  $Co_{\alpha}$ ,  $Co_{\beta}$ ,  $Ti_{\alpha}$ ,  $Ti_{\beta}$ ,  $Zr_{\alpha}$ ,  $Zr_{\beta}$ ,  $Sn_{\alpha}$ ,  $Sn_{\beta}$  и др.

Полиморфные модификации металлов, как правило, отличаются магнитными, электрическими, механическими, химическими и другими свойствами. Например, при температуре +13 °С происходит превращение белого олова ( $\beta$  - модификация) с тетрагональной кристаллической решеткой в серое ( $\alpha$  - модификация) с кубической решеткой. Превращение сопровождается увеличением объема решетки олова на 25,6 %, уменьшением плотности с 7290 кг/м<sup>3</sup> до 5850 кг/м<sup>3</sup> и возникновением напряжений, в результате которых оловянный слиток разрушается и превращается в порошок. Центры кристаллизации зарождаются в белом олове самопроизвольно преимущественно на поверхности образца. Вероятность их образования внутри образца мала вследствие насыщенности связей потенциального зародыша с окружающими его атомами металла. Неуравновешенные напряжения в слое кристаллов серого олова на поверхности образца приводят к возникновению трещин. В результате появления дефектных образований серого олова на поверхности белого («оловянная чума») изделия теряют прочность, пластичность, блеск и другие свойства.

Процессы полиморфных превращений обратимы. При нагревании, например, образца олова, пораженного «оловянной чумой», до 27 °С с последующей выдержкой при этой температуре наблюдается полное исчезновение фазы серого олова. При повторном охлаждении такого образца скорость превращения  $\beta \rightarrow \alpha$  возрастает. Полиморфные превращения в металлах и сплавах часто определяют их служебные характеристики. Так, для сплавов олова в области температур перехода  $\beta \rightarrow \alpha$  наблюдается скачкообразное изменение коэффициента трения. Этот эффект обратим и свойствен некоторым другим металлам и сплавам.

Полиморфные превращения лежат в основе *вторичной кристаллизации*, при которой новая кристаллическая фаза образуется из твердого вещества. Вторичная кристаллизация начинается с образования и роста центров кристаллизации. Различают нормальный (диффузионный) и мартенситный механизмы роста металлических кристаллов. Первый наблюдается при медленном охлаждении металлов с высокими температурами полиморфного превращения. Новая кристаллическая фаза в этом случае возникает на границах исходных зерен и растет благодаря последовательному перемещению атомов из высокотемпературной модификации. Для металлов с низкой температурой полиморфных превращений или при больших скоростях охлаждения характерен мартенситный механизм роста кристаллов. Низкие температуры обуславливают небольшую подвижность атомов, вследствие чего перестройка решетки металлов происходит путем совместного перемещения группы атомов на расстояния меньше атомных. Образующуюся новую фазу называют *мартенситом*. Кристаллы мартенсита когерентно (согласованно) связаны с исходными кристаллами, благодаря чему они растут с большой скоростью.

Полиморфное превращение в сплавах может протекать по диффузному механизму, сопровождающемуся перераспределением компонентов между растущей и исчезающей фазами. Так, при наличии в кристаллической решетке некоторых металлов растворенного водорода принципиально изменяется механизм их полиморфного превращения. Растворенный водород накапливается на границе раздела растущих и исчезающих кристаллов, обуславливая образование переходных слоев, обогащенных водородом. Благодаря росту переходных слоев создается возможность изменения кристаллической решетки металла без приложения внешнего воздействия (подобно течению вязкой жидкости). Обнаруженный механизм полиморфного превращения зарегистрирован как «явление возникновения подвижных водородонасыщенных метастабильных зон при полиморфном превращении металлов». На основе этого явления разработаны технологии изготовления изделий из металлов без применения традиционных способов деформирования, созданы принципиально новые способы формования изделий из металлов и сплавов (в том числе очень хрупких), соединения металлов с керамикой, получения монокристаллов, скоростной диффузионной сварки, выявления внутренних дефектов в изделиях, разработаны эффективные процессы дегазации стальных деталей.