

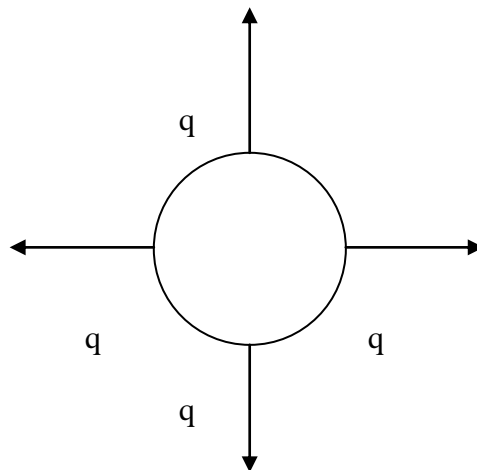
Некоторые заметки к теории кристаллизации.

Игнатов О.А.

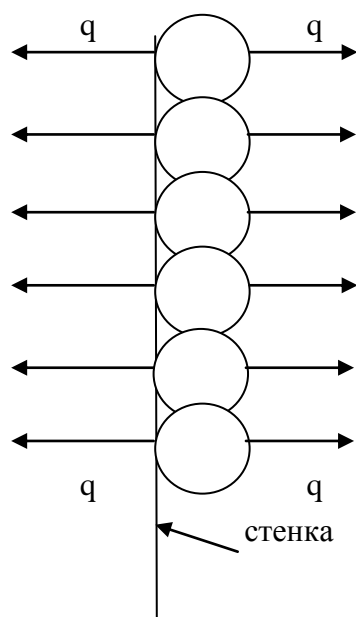
Представленная работа имеет своей целью определить процессы внутреннего теплопереноса в объеме кристаллизующегося металла.

Тепловые потоки при кристаллизации

Начнем данный раздел, вспомнив известное положение: каждое тело при переходе в иное агрегатное состояние выделяет (поглощает) определенное количество тепла. В нашем случае это скрытая теплота кристаллизации. Попробуем разобраться, как это тепло распределяется в кристаллизующейся системе: на элементарном уровне от закристаллизовавшегося объема выделяется квант тепла, который равномерно распределен по всем направлениям.



Но кристаллизация идет в основном от стенки, через которую идет отвод тепла от системы кристаллизующегося металла (слиток, кристаллизатор МНЛЗ, стенка отливки и т.д.). Если рассматривать систему как сумму кристаллизации элементарных объемов, то получается следующая картина:



Из приведенной схемы становится понятно, что **при кристаллизации помимо основного потока тепла, отводимого через стенку, существует еще один поток тепла, направленный к центральной оси кристаллизующегося объема**. Об этих потоках нет никаких упоминаний в литературе, но имеются факты, доказывающие его существование:

- При исследовании кристаллизации металла методом выливания жидкой сердцевины слитка, ошибка в толщине закристаллизовавшегося металла составляла 50-100% от расчетного. Это несоответствие объяснялось задержкой металла в междендритном пространстве. Задержка металла возможна, но не в таких количествах.
- При исследовании кристаллизации металла методом намораживания на основу в объеме расплава ошибка составляла 100-200 % от расчетного.
- При исследовании температуры жидкой сердцевины кристаллизующегося металла в слитке установлено, что температура перегрева металла в осевой части слитка сохраняется практически до конца кристаллизации. Данный факт был зафиксирован без объяснений причин указанного эффекта.

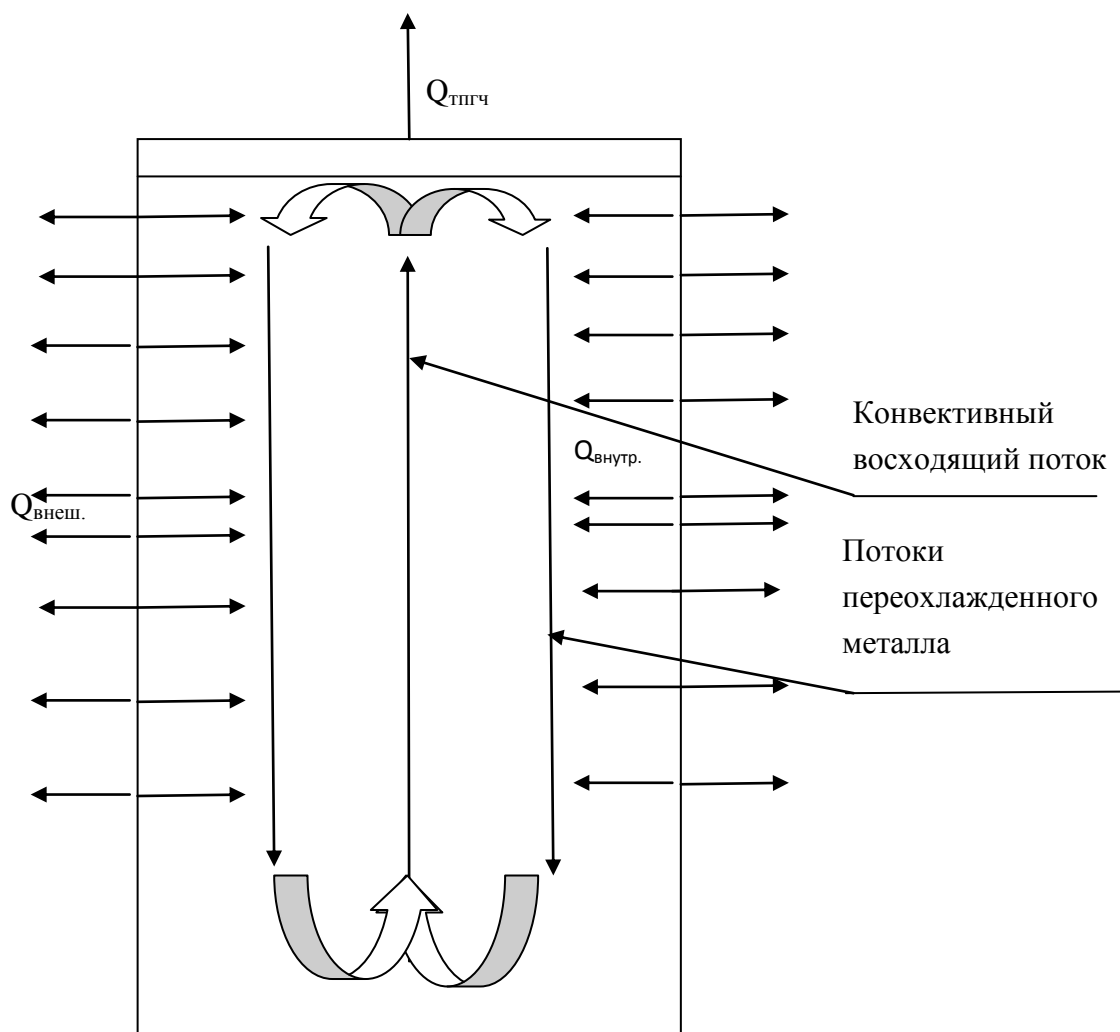
Все указанные эффекты достаточно просто и логично объясняются с учетом теплового потока, направленного внутрь кристаллизующейся системы.

Если с существованием внутреннего потока тепла при кристаллизации все более или менее понятно, то не будем задерживаться на описательной части, а перейдем к следующему понятию:

Взаимодействие тепловых потоков

Направленные внутрь системы тепловые потоки сходятся на одной оси – тепловой оси (слитка, заготовки МНЛЗ и т.д.) и не только поддерживают

температуру перегрева металла, но **и организуют конвективный поток металла при кристаллизации.** Схематично это выглядит следующим образом:



где: $Q_{\text{тпгч}}$ – теплотери от головной части системы

$Q_{\text{внеш.}}$ – теплотери от внешней части системы,

$Q_{\text{внутр.}}$ – тепловой поток, направленный внутрь кристаллизующейся системы.

Стоит немного остановиться на описании приведенной схемы для понимания процессов, происходящих при кристаллизации.

При наличии внутреннего теплового потока конвективный тепловой поток в данном случае регламентируется теплотерями от головной части системы, максимальный конвективный поток возможен при условии $Q_{\text{тпгч}} = Q_{\text{внутр.}}$. Так как теплотери от внешней части системы и тепловой поток, направленный внутрь кристаллизующейся системы взаимосвязаны, **конвективная составляющая при кристаллизации системы зависит от организации отвода тепла от стенок и поверхности системы.**

Но **при условии $Q_{\text{тпгч}} \leq Q_{\text{внутр.}}$** тепловой поток, направленный внутрь кристаллизующейся системы, направляется для сохранения температуры перегрева

жидкой части с последующим его снижением за счет потерь тепла от внешней части системы. В связи с тем, что при всех принимаемых мерах, довести значение потерь от головной части системы до абсолютного нуля не удастся, ***конвективный поток работает в режиме автоколебаний по типу работы гейзера***. Попробую объяснить данный процесс пошагово.

Сразу после заливки системы расплавом металла, подлежащем кристаллизации, происходит интенсивный теплоотвод от стенок системы, и создается тепловой поток, направленный внутрь системы, который организует тепло-массовые потоки, изображенные на схеме, приведенной выше. Жидкая составляющая системы начинает конвективное движение. Поднявшись вверх, жидкость сбрасывает перегрев, в ней начинает выделяться твердая фаза, которая опускаясь вдоль фронта кристаллизации активно участвует в «строительстве» кристаллов. При $Q_{\text{тпгч}} \leq Q_{\text{внутр}}$ происходит накопление тепла внутри системы и конвективный поток затухает. Прирост кристаллизующегося металла за счет твердо-жидкой фазы, опускающейся вдоль фронта кристаллизации прекращается, но кристаллизация за счет теплоотвода от внешней части системы продолжается. При кристаллизации неметаллические включения и газы вытесняются на фронт кристаллизации и накапливаются. При этом на систему действуют силы всплытия газов и включений (по закону Стокса), которые противонаправлены конвективному потоку. По достижении критических значений газы всплывают на поверхность системы, вынося при этом неметаллические включения и образуя дефекты в виде «шнуров» или образуют дефекты в виде внецентренной ликвации. Система освобождается от сил всплытия и в ней начинает зарождаться следующий конвективный поток, приводящий к внутреннему тепло-массопереносу. Наличие дефектов в виде «шнуров» и колебаний в движении металла при кристаллизации, зафиксированные при радиографических исследованиях слитков, подтверждают приведенную теорию.

Самое интересное в данной теории – это анализ проведенных разными авторами парадоксальных экспериментов с новой точки зрения. Один из классических примеров – последний опыт со слитком Мадянова, после которого он перешел к теме суспензионной разливки сталей. Сознательно не привожу данный опыт в этой статье, тому, кто действительно заинтересовался излагаемой проблемой, не составит большого труда найти первоисточники. Перейду сразу к выводам. Увеличив отбор тепла от верхней части системы, он добился устойчивого конвективного потока при кристаллизации, при котором выделяемые при кристаллизации газы и неметаллические включения конвективным потоком выносились в прибыльную часть слитка, уйдя при этом от всех дефектов, связанных с прерыванием потока. Но не совсем верно подобранные параметры охлаждения верхней части системы привели к распространению усадочной раковины в тело слитка. Для Мадянова это стало тупиком, но в наших работах стали отправной точкой.

Условно можно принять, что *процесс кристаллизации складывается из процесса нарастания твердой фазы от стенки* (плоскости отвода тепла) *и от конвекционного потока, приносящего переохлажденную фазу* как строительный материал *к фронту кристаллизации. В условиях* постоянного присутствия *конвекционного потока зона столбчатых кристаллов отклоняется от направления отвода тепла в сторону подпитки конвекционным потоком фронта кристаллизации переохлажденной фазой*, что хорошо заметно при рассмотрении макротемплетов от слитков или заготовок. Технологически «задавлявая» конвекционные процессы можно добиться сходимости тепловых расчетов с протеканием процесса кристаллизации, но при этом теряем не менее важную составляющую влияния конвекционного потока на процесс кристаллизации, оставляя в отлитой заготовке дефекты, связанные с прерыванием конвекционных потоков.

Проведенные работы позволили нащупать рычаги управления внутренней структурой заготовки, но добиться широкого промышленного применения данных разработок удалось только на узком сегменте заготовок. В дальнейшем работы были свернуты по независящим от нас причинам.

Стоит отметить, что данная теория создавалась на основе проведенных опытов различных научных школ бывшего СССР и авторами. Сами же опыты проводились изначально на ощупь от одного результата к другому. По цепочке это выглядит так: от опытов к теории, от теории к осмыслению проведенных работ и продолжению опытов для достижения намеченного результата. Пожалуй, только опубликование и обсуждение данной теории сможет дать толчок к дальнейшему ее осмыслению, обсуждению и применению на практике. Стоит отметить, что данная теория полностью меняет подход к методам воздействия на кристаллизующийся металл, и позволяет прогнозировать повышение качества и уменьшение потерь при производстве стали как при непрерывных процессах, так, и при кристаллизации дискретных систем, причем описанные выше процессы резко увеличиваются с ростом объема кристаллизующегося металла.