

УДК 621.74

В.М. Сенопальников, В.Л. Сивков

## О СВЯЗИ КОНВЕКЦИИ С РАЗВИТИЕМ НЕОДНОРОДНОСТИ В СЛИТКЕ СПОКОЙНОЙ СТАЛИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

На основании литературных данных и собственных исследований предложен механизм связывающий формирование структурных и ликвационных дефектов в слитке спокойной стали с конвективным движением затвердевающего расплава.

*Ключевые слова:* стальной слиток, конвекция, структурная неоднородность, ликвация, градиент скорости, изолированные кристаллы.

В классическом случае кристаллическое строение стального слитка предусматривает наличие трех зон – поверхностной мелких равноосных (замороженных, резкоохлажденных) кристаллов, столбчатых кристаллов (шестоватых) и разноориентированных (равноосных, глобулярных) кристаллов. В последней выделяются: мелкокристаллическая структура в придонных объемах – «конус кристаллов»;  $\Lambda$ -образная внеосевая сегрегация, «мост» – область плотного металла в подприбыльной части слитка, состоящая из крупных разноориентированных кристаллов, под которой располагается V-образная неоднородность; зоны положительной и отрицательной ликвации.

Рассмотрим возможный механизм формирования указанных видов неоднородности с учётом гетерогенного механизма зарождения кристаллов в переохлаждённом расплаве и результатов исследований [1] конвекции расплава при формировании слитка (рис. 1).

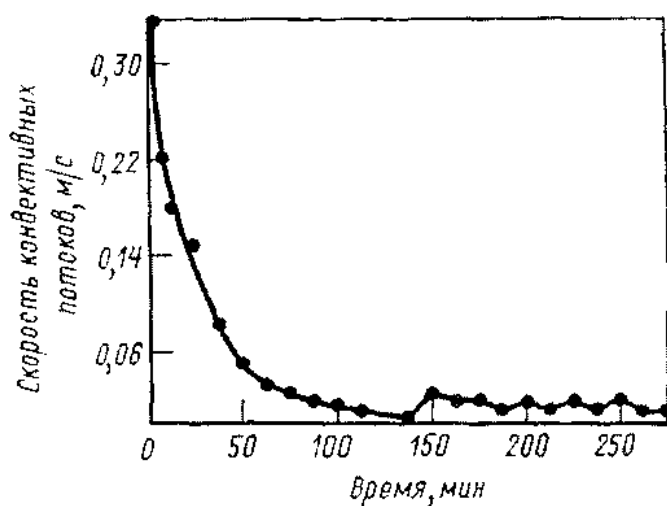


Рис. 1. Изменение скорости конвективных потоков в 40-тонном слитке в зависимости от продолжительности кристаллизации (через 50 мин после окончания заливки – 0,03 м/с; через 130 мин равна нулю) [1]

зародившихся кристаллов препятствует их росту, а металлостатическое давление – смыванию с последнего слоя.

**Формирование зоны замороженных кристаллов** происходит в условиях интенсивной конвекции. Отсюда следует, что зарождение первого слоя кристаллов этой зоны возможно только на поверхности изложницы – при отсутствии прочного сцепления с формой эти кристаллы неизбежно были бы смыты нисходящим потоком, скорость которого более 0,3 м/с (турбулентный режим течения). Часть кристаллов, зародившихся в переохлаждённом расплаве на некотором удалении от поверхности формы, уносится конвективным потоком и расплавляется в перегретом объеме стали. Но другая часть присоединяется к поверхности охлаждения за счёт усадочных перемещений расплава, возникающих при затвердевании первого слоя. При этом значительное количество зародившихся кристаллов препятствует их росту, а металлостатическое давление – смыванию с последнего слоя.

Сила, действующая на изолированные кристаллы со стороны жидкости, перемещающейся вследствие усадки, определяется как [2]:

$$F_{\text{ус.к}} = - \int_0^V \text{grad } P_{\text{ус.к}} dV_{\text{к}}, \quad (1)$$

где  $\text{grad } P_{\text{ус.к}} = \gamma v_x dv_x/dx$  – градиент давления в расплаве, обеспечивающий перемещение жидкости к фронту затвердевания вследствие изменения объёма при фазовом переходе;  $\gamma$  – плотность жидкости;  $v_x$  – скорость усадочных перемещений жидкости к фронту затвердевания;  $V_{\text{к}}$  – объёмы кристалла.

Исходя из сказанного, можно объяснить существенное расширение (в 3-5 раз, [3]) поверхностного слоя мелкозернистой структуры в объёмах слитка изолированных от естественной конвекции, – все зарождающиеся в переохлаждённом слое кристаллы присоединяются к вертикальному фронту затвердевания. Следует отметить, что при малом переохлаждении в пристенном слое (имеет место в случае интенсивной вынужденной конвекции за счёт электромагнитного перемешивания расплава при формировании слитков ВДП [4] или использовании предварительно разогретой футеровки прибыльной надставки при литье обычных слитков [5]) «замороженный» слой, как правило, не образуется.

**Формирование столбчатой структуры.** Вследствие нарастания теплового сопротивления затвердевшей корки и выделения теплоты кристаллизации величина термического переохлаждения перед фронтом затвердевания ( $\Delta T_{\text{п}}$ ) становится недостаточной для зарождения изолированных кристаллов ( $\Delta T_{\text{з.кр}}$ ), но достаточной для роста их осей ( $\Delta T_{\text{р.к}}$ ):

$$\Delta T_{\text{р.к}} < \Delta T_{\text{п}} < \Delta T_{\text{з.кр}}. \quad (2)$$

В этих условиях начинается преимущественный рост осей кристаллов «замороженного» слоя в сторону, обратную направлению градиента температуры в слитке, так как рост параллельно поверхности охлаждения невозможен из-за наличия соседних дендритов. Рост дендритов сопровождается образованием на их поверхности слоя, обогащенного ликвирующими примесями. Температура ликвидуса сплава в этом слое падает, соответственно снижается и величина термического переохлаждения. При наличии достаточно интенсивного турбулентного потока, нисходящего вдоль фронта затвердевания, обеспечивается интенсивная конвективная диффузия примесей с обращенной к расплаву поверхности столбчатых кристаллов, что стимулирует их рост в направлении обратном теплоотводу. В тоже время усадка при фазовом переходе препятствует выносу обогащенного примесями расплава из межосных пространств в жидкую сердцевину слитка, что тормозит кристаллизацию в этих пространствах. Развивается твердо-жидкая область. При её затвердевании получает развитие дендритная неоднородность, но отсутствует макроликвация. В результате химический состав транскристаллитной зоны слитков спокойной стали, определяемый по анализу стружки, соответствует ковшевой пробе (в кипящей стали интенсивное газовыделение способствует выносу ликваторов в жидкую фазу и обеднению зоны столбчатых кристаллов углеродом и примесями [6]).

**Развитие жидко-твёрдой области в формирующемся слитке.** По мере снижения температурного градиента перед фронтом затвердевания (из-за увеличения теплового сопротивления затвердевающей корки стали, охлаждения внутренних объемов расплава и нагрева изложницы) скорости конвективных потоков в расплаве уменьшаются, турбулентное течение переходит в ламинарное. Интенсивность конвективной диффузии примесей от поверхности кристаллов в расплав в значительной мере снижается. Это приводит к возрастанию концентрации примеси в ликвационном слое и снижению температуры ликвидуса сплава. Соответственно непосредственно перед вершинами столбчатых кристаллов величина термического переохлаждения расплава становится меньше, чем на некотором удалении от него. Это явление А. Оно [7] назвал «концентрационной депрессией термического переохлаждения» ( $\Delta T_{\text{кдтп}}$ ). Д.Д. Саратовкин полагает: «Область жидкой фазы оказывается изолированной от твердой фазы слоем повышенной концентрации примесей, и дальнейшая кристаллизация в

ней может происходить путём образования новых центров кристаллизации, возникающих благодаря местному переохлаждению на некотором расстоянии от конца дендритов зоны транскристаллизации» [8].

В ликвационном слое перед фронтом кристаллизации переохлаждение ( $\Delta T_{\text{п}} - \Delta T_{\text{КДТП}}$ ) является достаточным для роста кристаллов, но недостаточным для зарождения новых:

$$\Delta T_{\text{р.к}} < \Delta T_{\text{п}} - \Delta T_{\text{КДТП}} < \Delta T_{\text{з.кр}}. \quad (3)$$

Непосредственно за зоной КДТП термическое переохлаждение расплава достигает величин, достаточных для зарождения кристаллов на имеющихся активных примесях:

$$\Delta T_{\text{п}} - \Delta T_{\text{КДТП}} > \Delta T_{\text{з.кр}}. \quad (4)$$

При затвердевании технически чистых металлов малая концентрация примесей в расплаве (и соответственно низкие значения  $\Delta T_{\text{КДТП}}$  на фронте твердо-жидкой зоны) не препятствует росту столбчатых кристаллов даже при незначительной интенсивности конвекции в малых объёмах, но в реальных сплавах снижение  $\Delta T_{\text{КДТП}}$  перед межфазной поверхностью достигается только в условиях турбулентного конвективного потока.

Повышенной длительностью интенсивной естественной конвекции жидкого металла можно объяснить факты увеличения протяженности столбчатой структуры при повышении перегрева расплава, разливаемого в изложницы, а также при возрастании массы слитка [9].

**Массоперенос при формировании зоны разноориентированных кристаллов.** Рассмотрим силы, действующие на зародившиеся за зоной КДТП изолированные кристаллы.

1. Силы давления со стороны потока расплава, направленного на компенсацию усадки в твёрдо-жидкой зоне, определяются выражением (1) и обеспечивают перенос кристаллов к фронту затвердевания.

2. Силы гравитации – повышенная плотность (~ на 4%) твёрдых частиц по сравнению с расплавом приводят к их погружению в последний.

3. Силы давления со стороны нисходящего конвективного ламинарного потока возникают в связи с наличием градиента скорости в поперечном сечении этого потока. Направление этих сил определяется из следующих соображений. Непосредственно за зоной КДТП переохлаждение расплава и его плотность максимальны. Соответственно максимум скорости нисходящего ламинарного конвективного потока ( $v_{\text{п}} = \max$ , рис. 2, а) располагается на некотором расстоянии от границы твёрдо-жидкой и жидко-твёрдой зон, определяемом шероховатостью первой и вязкостью расплава. Далее скорость движения жидкости падает до нуля на границе с восходящим потоком. Изолированные кристаллы погружаются в жидкости ( $v_{\text{к}} > v_{\text{п}}$ ), причем скорость погружения увеличивается по мере удаления от фронта кристаллизации, так как менее переохлажденная жидкость имеет пониженную вязкость (рис. 2, б). Профиль величин скорости движения кристаллов относительно перемещающегося расплава  $v_{\text{к}}$ , имеет максимумы на линиях нулевых скоростей конвекции и минимум по линии максимальной скорости потока (рис. 2, в).

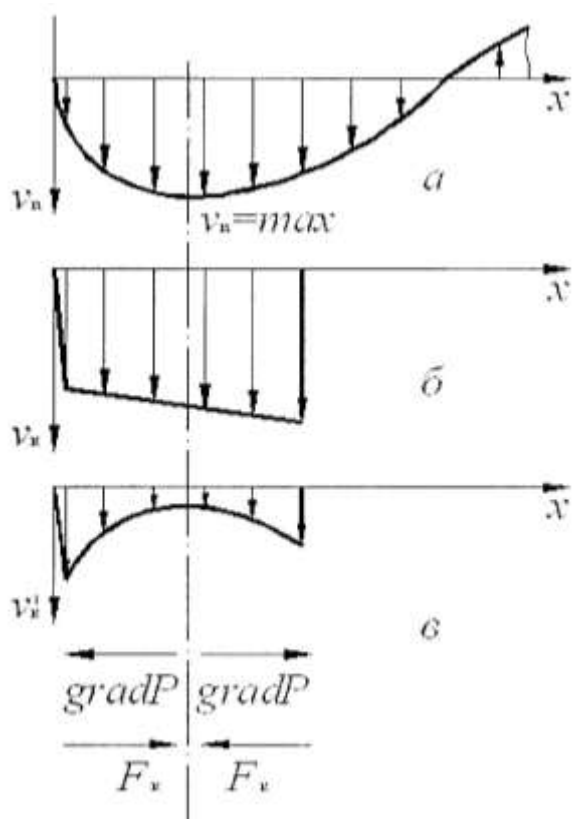
Максимальное давление имеет место в зоне минимальной скорости и по сечению двухфазного потока возникают разнонаправленные градиенты давления и силы, перемещающие кристаллы (рис. 2, в):

$$F_{\text{к}} = - \int_0^v \text{grad } P_{\text{к}} dV,$$

где  $\text{grad } P_{\text{к}} = \gamma v'_{\text{к}} dv'_{\text{к}}/dx$ ;  $P_{\text{к}}$  – давление на изолированный кристалл со стороны нисходящего потока расплава;  $v'_{\text{к}}$  – скорость движения изолированных кристаллов относительно перемещающегося расплава, ( $v'_{\text{к}} = v_{\text{к}} - v_{\text{п}}$ ).

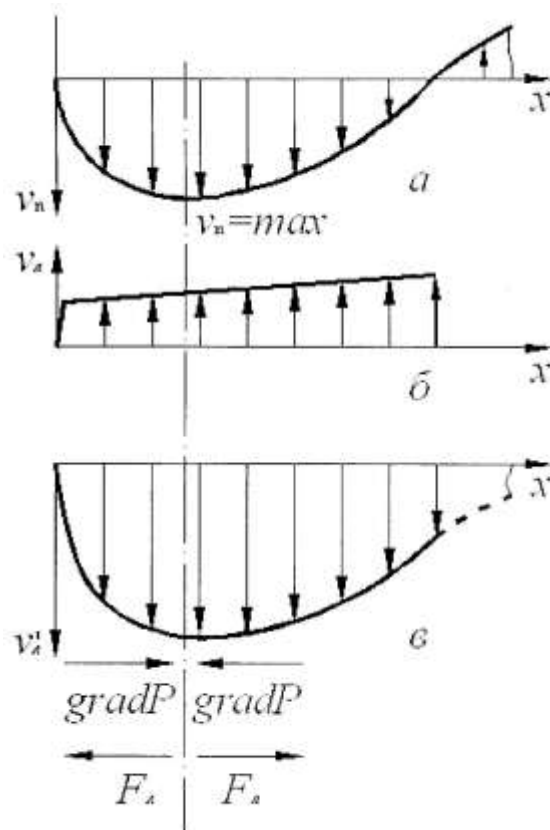
Таким образом, в нисходящем конвективном потоке возникают силы, способствующие концентрации изолированных кристаллов вдоль оси максимальной скорости этого потока и препятствующие их переносу к фронту твердо-жидкой зоны усадочными перемещениями.

Исключением является узкая пристенная область двухфазного потока (скорость потока на границе раздела фаз равна нулю). Здесь силы, действующие на кристаллы  $F_{\text{ус.к}}$  и  $F_{\text{к}}$ , однонаправлены. Это препятствует отрыву присоединившихся к фронту твердой фазы изолированных кристаллов.



**Рис. 2. Схема возникновения сил давления в нисходящем потоке расплава на изолированные кристаллы:**

*а* – профиль скоростей конвективного потока;  
*б* – профиль скоростей погружения кристаллов в расплаве;  
*в* – профиль скоростей движения кристаллов относительно жидкости



**Рис. 3. Схема возникновения сил давления в нисходящем потоке расплава на ликваты:**

*а* – профиль скоростей конвективного потока;  
*б* – профиль скоростей всплывания ликватов в расплаве;  
*в* – профиль скоростей движения ликватов относительно жидкости

Наличие переохлаждения в расплаве обеспечивает рост изолированных кристаллов и, как следствие, обогащение поверхности их осей примесями. Часть ликватов выносятся из межосных пространств в окружающий расплав вследствие газовой выделению (при снижении растворимости газов при фазовом переходе), капиллярного и фильтрационного массопереноса [1]. Можно предположить, что, имея отличное от окружающего расплава поверхностное натяжение и вязкость, а также пониженные плотность и температуру затвердевания, ликваты могут какое-то время существовать в виде самостоятельных образований. На эти образования, так же, как на изолированные кристаллы, действуют силы давления, возникающие при усадочных перемещениях расплава  $F_{\text{ус.л}}$  и вследствие наличия градиента скорости по сечению нисходящего потока  $F_{\text{л}}$ :

$$F_{\text{ус.л}} = - \int_0^V \text{grad } P_{\text{ус.л}} dV_{\text{л}}, \quad F_{\text{л}} = - \int_0^V \text{grad } P_{\text{л}} dV_{\text{л}},$$

где  $\text{grad } P_{\text{ус.л}} = \gamma v_x dv_x/dx$  – градиент давления в расплаве, обеспечивающий перемещение жидкости к фронту затвердевания вследствие изменения объема при фазовом перехо-

де;  $V_{л}$  – объем ликвата;  $\text{grad } P_{л} = \gamma v'_{л} dv'_{л}/dx$ ;  $P_{л}$  – давление на ликват со стороны нисходящего потока жидкости;  $v'_{л}$  – скорость движения ликвата относительно расплава в потоке ( $v'_{л} = v_{л} - v_{л}$ ).

Ликваты всплывают в расплаве, причём скорость всплывания увеличивается по мере приближения к оси слитка в связи со снижением вязкости расплава (рис. 3, б). Профиль величин скорости движения ликватов относительного перемещающейся жидкости в нисходящем потоке ( $v'_{л}$ ), имеет максимум по линии наибольшей скорости конвекции (рис. 3, в).

Силы давления со стороны расплава на ликваты ( $F_{л}$ ) в сечении нисходящего потока в пристенной области направлены от линии наибольших скоростей к фронту твердо-жидкой зоны и однонаправлены с усадочными перемещениями расплава. За линией наибольших скоростей эти силы направлены к оси слитка. Градиент скорости по сечению и высоте потока способствует коалесценции ликватов. Частота их слияний резко возрастает с увеличением их размера и определяется зависимостью [2]:

$$M = \frac{4}{3} N \text{ grad } v (R_1 + R_2)^3,$$

где  $N$  – число частиц;  $\text{grad } v$  – градиент скорости потока;  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы частиц.

В ускоряющейся части нисходящего потока крупные объединения ликватов вытягиваются вдоль линий тока и одновременно переносятся к линиям наименьших скоростей этого потока (к фронту затвердевания и в обратный восходящий поток).

**Формирование разноориентированной структуры.** Как пишет Д.Д. Саратовкин: «Следует иметь в виду, что образование центров кристаллизации во второй<sup>1</sup> двухфазной области начинается не тогда, когда кристаллизация в первой<sup>2</sup> зоне уже полностью закончена. В некоторый период времени происходит одновременно и медленный рост транскристаллов от стенок и образование этих новых центров в этой второй двухфазной области» [8].

Можно предположить, что формирование смешанной структуры (участки столбчатой структуры по высоте слитка сменяются участками разноориентированной) связано с переходным режимом от турбулентного к ламинарному потоку, нисходящему вдоль фронта затвердевания – в зонах турбулентных пульсаций обеспечивается более интенсивная диффузия примесей в объём жидкой фазы, чем в ламинарной области. Поэтому в некоторый период времени на соседних участках фронта затвердевания создаются преимущественные условия для образования той или иной формы дендритов.

Появление перед твердо-жидкой областью изолированных кристаллов и их рост изменяет характер усадочных перемещений расплава. Компенсация усадки происходит как в неподвижной, так и в подвижной зонах двухфазной области. Соответственно поток расплава в направлении поверхности охлаждения ослабевает, скорость перемещения жидкой фазы и силы, транспортирующие изолированные кристаллы к вертикальной поверхности твердой фазы, уменьшаются. По мере снижения температурного градиента в расплаве расширяется подвижная часть двухфазной области. Часть кристаллов, не достигая вертикального фронта затвердевания, оседает в придонный объём слитка.

Отвод теплоты кристаллизации от зарождающихся и растущих изолированных кристаллов к твердой фазе происходит теперь через пристенный слой расплава, повышая градиент температуры в нем. Развитие жидко-твердой зоны начинается с более охлажденных придонных объемов, постепенно распространяясь вверх. Движение изолированных кристаллов и ликватов у вертикального фронта затвердевания определяется векторной суммой скоростей вдоль оси слитка и нормально ей.

В поперечном сечении нисходящего вдоль вертикального фронта затвердевания потока в пристенной области (до линии максимальных скоростей потока) силы  $F_{ус.к}$  и  $F_k$  имеют

<sup>1</sup> Жидко-твердой по принятой в настоящее время терминологии.

<sup>2</sup> Твердо-жидкой области по принятой в настоящее время терминологии.

противоположное направление и скорость переноса изолированных кристаллов к границе твердо-жидкой области определяется их соотношением.

Фиксация изолированных кристаллов на дендритном каркасе твердой фазы происходит за счет разности давлений: со стороны неподвижного фронта двухфазной зоны имеет место разрежение в межосных пространствах, вызванное усадкой, а со стороны оси слитка – металлостатическое давление, что исключает их смещение вдоль фронта твердо-жидкой фазы. При их встрече с неподвижным дендритным каркасом разрушается ликвационный слой на поверхности осей в зоне касания, что способствует диффузионным процессам при их срастании. Закрепившиеся на границе твердо-жидкой зоны кристаллы продолжают укрупняться (теплоотвод идет через твердую фазу), причем рост осей предпочтителен вдоль изотерм. Это сглаживает границу раздела подвижной и неподвижной областей двухфазной зоны.

Скорость продвижения фронта твердо-жидкой зоны, наряду с теплоотводом, определяется частотой присоединения изолированных кристаллов, их размером и интенсивностью роста после присоединения.

По мере затвердевания слитка снижается теплоотвод от его поверхности. Это приводит к уменьшению скорости продвижения границы твердо-жидкой зоны, усадочных перемещений расплава и величин соответствующих сил  $F_{ус.к}$  и  $F_{ус.л}$ . В то же время интенсивность движения двухфазного (суспензионного) потока определяется в основном содержанием в нем кристаллов и изменяется незначительно (рис.1.). Поскольку в расплаве имеет место градиент температуры по высоте слитка, то доля твердой фазы в нисходящем потоке возрастает сверху вниз. Соответственно скорости двухфазного потока и величины сил давления на изолированные кристаллы и ликваты по его сечению ( $F_{дк}$  и  $F_{л}$ ) будет возрастать сверху вниз, снижаясь в придонной области перед поворотом.

Формирование зоны разноориентированной структуры можно условно разделить на три периода.

1. Начальный период продолжается в интервале времени от прекращения роста столбчатых до начала осаждения изолированных кристаллов и характеризуется интенсивным теплоотводом от слитка и соответственно значительными усадочными перемещениями расплава ( $F_{ус.к} > F_{к}$ ). Все кристаллы из жидко-твердой зоны переносятся к фронту затвердевания. Их перемещение вдоль границы твердо-жидкой области и влияние на скорость нисходящего конвективного потока незначительны. Малое время пребывания изолированных кристаллов в объеме расплава перед вертикальным фронтом затвердевания предотвращает выделение по их межосным пространствам ликватов.

Наличие области наиболее охлажденного расплава (вследствие градиента температуры по высоте) и низкая интенсивность конвекции в донной части слитка приводят к тому, что  $\Delta T_{КДП}$  и, соответственно, изолированные кристаллы в объеме расплава над зоной столбчатых кристаллов горизонтального фронта затвердевания появляются раньше, чем перед вертикальным. Присоединение изолированных кристаллов, зарождающихся непосредственно перед донным (горизонтальным) фронтом кристаллизации, происходит под действием гравитации с минимальным пробегом. Контакт слитка с массивным поддоном обеспечивает усиленный теплоотвод. Эти факторы в данный период обеспечивают опережающее продвижение горизонтального фронта твердо-жидкой зоны по сравнению с вертикальным. Следствием этого является меньшая, чем на боковых гранях слитка, протяженность зоны столбчатых дендритов.

Большое число зародившихся кристаллов ограничивает возможности их роста вдоль изотерм, поэтому главные оси этих дендритов ориентированы в направлении градиента температуры. Отвод теплоты кристаллизации происходит как в поддон, так и с восходящим, обратным двухфазному, потоком расплава, создавая благоприятные условия для зарождения и роста изолированных кристаллов и одновременно для удаления выделяющихся из межосных пространств ликватов. Следствием последнего процесса, является обеднение придонных объемов углеродом, серой и фосфором. При этом понижение содержания ликвирующих эле-

ментов в объеме «конуса» особенно значительно на некотором удалении от границы столбчатой зоны, где происходит снижение интенсивности теплоотвода и увеличение продолжительности роста изолированных кристаллов. Поскольку зарождение последних происходит на активных примесях, то мелкокристаллическое строение придонной структуры характеризуется повышенным содержанием первичных неметаллических включений на единицу объема.

С течением времени жидко–твердая область распространяется в пристенном слое на всю высоту слитка.

В области теплового влияния прибыли поступающий сверху расплав с повышенной температурой обеспечивает максимальный по высоте тела слитка градиент температуры перед фронтом твердо-жидкой фазы. Ширина зоны термически переохлажденного расплава здесь мала. Незначительный объем зарождающихся изолированных кристаллов, несмотря на высокую скорость их переноса, приводит к низкой интенсивности продвижения границы твердо-жидкой области. Малая частота присоединения кристаллов не препятствует их росту на фронте раздела двухфазной зоны, вследствие чего формируется крупнокристаллическая разноориентированная структура.

На участке ниже зоны теплового влияния прибыли усадочные перемещения расплав переносит все зарождающиеся кристаллы к фронту твердо-жидкой зоны с минимальным пробегом вдоль него. В результате формируется мелкокристаллическая (глобулярная) структура. На всей длине этого участка протяженность зон «замороженных» и столбчатых кристаллов по высоте слитка и тепловое сопротивление их слоя различаются незначительно, а скорость нисходящего потока увеличивается до максимума на некотором удалении от донного фронта, снижаясь перед поворотом.

В связи с тем, что распространение жидко-твердой зоны происходит снизу вверх, толщина слоя присоединенных к вертикальной границе твердой фазы изолированных кристаллов увеличивается в том же направлении. Развивается обратная конусность бокового фронта затвердевания.

Таким образом, в рассмотренный период затвердевания продвижение фронта твердой фазы происходит последовательно, не смотря на зарождение кристаллов в объеме расплава, и, весьма вероятно, по параболическому закону (по данным Б.Б.Гуляева, формула  $\xi = k\sqrt{\tau}$  даёт удовлетворительное совпадение с фактическими данными в пределах первых  $\frac{3}{4}$  радиуса слитка массой до 8т [10]).

2. В этот период и в дальнейшем теплоотвод от слитка к изложнице определяется в основном тепловым сопротивлением затвердевшего слоя сплава. Интенсивность усадочных перемещений расплава и соответственно скорость продвижения границы твердо-жидкой области уменьшаются. Соотношение сил в сечении нисходящего конвективного потока изменяется –  $F_{\text{в.к}}$  становится соизмеримо  $F_{\text{к}}$ , что тормозит перенос изолированных кристаллов к фронту твердой фазы.

При увеличении временного интервала нахождения в переохлажденном расплаве кристаллы укрупняются, выделяя теплоту кристаллизации. Их рост в объеме жидкой фазы энергетически предпочтителен зарождению новых. Эти факторы препятствует развитию широкой жидко-твердой области, а также приводит к огрублению структуры. Одновременно в связи с увеличением плотности суспензии по сравнению с расплавом в осевой части слитка, скорость течения образующегося двухфазного потока возрастает (рис.1,  $\tau = 150$  мин).

Преимущественный рост осей изолированных кристаллов в направлении теплоотвода нарушает симметрию последних и вызывает их вращение при погружении в расплаве. В результате, после присоединения к фронту твердой фазы, их главные оси, несмотря на наличие температурного градиента в радиальном направлении формирующегося слитка, не имеют четкой направленности («разноориентированы»).

Ниже зоны теплового влияния прибыли, в расширяющейся области переохлажденного расплава, идет активное зарождение изолированных кристаллов. По мере удаления от прибыльной части слитка скорость двухфазного потока возрастает, траектория перемещения

кристаллов к границе твердо-жидкой зоны становится всё более пологой, продолжительность пребывания и роста кристаллов в двухфазном потоке возрастает.

В нижней части этого участка значительная часть изолированных кристаллов не достигает вертикальной границы твердо-жидкой области и оседает в придонные объемы. Значительная продолжительность пребывания этих кристаллов в объеме жидкой фазы способствует отделению от них ликватов.

Рост частиц твердой фазы, погружающихся в потоке расплава, сопровождается выделением теплоты кристаллизации и уменьшением переохлаждения расплава перед вертикальным фронтом затвердевания. В результате тормозится зарождение новых и рост присоединившихся к затвердевшей корке кристаллов, а на участке наибольших скоростей нисходящего потока продвижение фронта твердо-жидкой зоны замедляется. Толщина затвердевшего от стенки изложницы слоя по высоте слитка (ниже зоны теплового влияния прибыли) сначала выравнивается, а затем граница раздела фаз верхним краем постепенно наклоняется к оси слитка и в продольном сечении при малой обратной конусности изложницы (~2–6%) принимает форму, близкую к усеченному конусу (Λ-образную). Наличие прямой конусности границы твердой фазы при затвердевании слитков четко зафиксировано путем выливания жидкой фазы [11] и при исследовании с помощью радиоактивных изотопов [12].

В ускоряющемся двухфазном потоке, из выделяющихся по межосным пространствам кристаллов ликватов, формируются крупные образования, которые сносятся по его течению и вытягиваются в струи («жидкие шнуры») вдоль границы твердо-жидкой области, фиксируясь на ней усадочными перемещениями расплава. Присоединяющиеся к дендритному каркасу поверх этих образований ликваты увеличивают их объем, а кристаллы погружаются в них и, срастаясь с соседними, замыкают «жидкие шнуры» со стороны оси слитка. Эти образования в момент своего присоединения приблизительно очерчивают фронт твердо-жидкой области и после полного затвердевания слитка проявляются как шнуры внеосевой неоднородности. Периодичность расположения шнуров в поперечном сечении слитка зависит от радиуса зоны коагуляции ликватов и их общего объема. Протяженность этих образований увеличивается с возрастанием содержания ликватов в расплаве и уменьшением интенсивности присоединения изолированных кристаллов к границе твердо-жидкой зоны. По мере продвижения вертикального и донного фронтов твердо-жидкой зоны, область протяженных ликвационных образований смещается к оси и верхним горизонтам слитка. В слитках малой высоты и массы, где скорости двухфазного потока не достигают больших величин, эти процессы или не имеют развития, или развиваются только в нижних и прибыльных объемах, а в крупных слитках «усы» возникают по всей высоте.

Подтверждением начала формирования внеосевой неоднородности в подвижной части двухфазной зоны служат результаты экспериментов по МГД – воздействию на затвердевание в результате которых путём изменения характера естественной конвекции были достигнуты как поворот шнуров в вертикальной и горизонтальной плоскостях, так и их полное подавление [13].

«Сброс» ликватов в шнуры приводит к обеднению примесями соседних объемов затвердевшего металла в теле слитка. Последнему также способствует вынос части ликватов в восходящий осевой конвективный поток. Снижение содержания примесей в основном металле области проявления внеосевой неоднородности зафиксировано в ряде исследований.

В донной части происходит торможение и поворот двухфазного потока, что приводит к осаждению содержащейся в нем твердой фазы и возрастанию скорости вертикального затвердевания слитка.

На стыке вертикального и горизонтального фронтов кристаллизации имеет место наиболее сильный теплоотвод. В тоже время сюда с конвективным потоком поступает расплав с повышенной температурой. Совокупность этих факторов создают условия для роста первых присоединившихся к фронту столбчатой структуры изолированных кристаллов и



препятствуют зарождению новых. По внешнему периметру мелкокристаллической зона формируется крупнокристаллическая, наличие которой отмечается в работе[5].

С началом осаждения изолированных кристаллов вдоль вертикального фронта происходит образование «вала» по внешнему контуру горизонтального фронта твердо-жидкой фазы. Внутри образовавшегося «кратера осаждения»[14] продолжается процесс зарождения и присоединения к фронту твердо-жидкой фазы изолированных кристаллов. В формировании «внутренней зоны» принимают участие также наиболее мелкие кристаллы из нисходящего двухфазного потока, выносимые с расплавом в осевую часть придонного объема.

На участке торможения двухфазного потока, скорость продвижения вертикальной границы твердо-жидкой зоны за счет присоединения оседающих кристаллов больше, чем в вышележащей области. Постепенно образующийся выступ отклоняет двухфазный поток к оси слитка. Зона осаждения изолированных кристаллов также смещается в этом направлении, перекрывая продвигающийся горизонтальный фронт твердо-жидкой фазы. В результате внутри структуры, образованной кристаллами, зародившимися перед вертикальным фронтом твердо-жидкой фазы и укрупнившимися по ходу осаждения, остается «внутренняя зона» более мелких кристаллов, зародившихся перед горизонтальным фронтом. Этот объем обеднен ликвирующими примесями и обогащен первичными неметаллическими включениями. В то же время осаждающиеся изолированные кристаллы, вследствие достаточно длительного пребывания в объеме расплава также обедняются элементами с малым коэффициентом распределения, что особенно характерно для крупных слитков. Поэтому зона отрицательной ликвации может по объёму значительно превышать «конус» мелких кристаллов. В крупных слитках «внутренняя зона» отрицательной ликвации может существенно отличаться по химическому составу от «внешней». Это четко выявлено при исследовании слитков 51 т и 52 т [15].

Далее граница жидко-твёрдой фазы в нижней части затвердевающего слитка приобретает в сечении форму, напоминающую параболу, обращенную вершиной вниз (или обратный конус в мелких слитках), и продвигается вверх в основном за счет присоединения оседающих изолированных кристаллов.

Часть выделившихся в жидко–твёрдой зоне ликватов выносится в восходящий поток и, растворяясь в расплаве, обогащает его ликвирующими элементами с малым коэффициентом распределения. Вследствие конвекции этот процесс распространяется на весь незатвердевший объём слитка. Таким образом, концентрационный градиент между маточным расплавом и межосными пространствами вновь зарождающихся изолированных кристаллов уменьшается, что приводит к росту концентрации примесей в этих пространствах. Присоединение к вертикальному фронту затвердевания этих кристаллов приводит к развитию положительной ликвации в радиальном направлении формирующегося слитка, а осаждение – к постепенному переходу от отрицательной сегрегации к положительной по высоте.

3. Этот период характеризуется минимальными перегревом жидкой фазы, теплоотводом от слитка к изложнице и шириной зоны переохлаждения. Скорость продвижения границы твердо-жидкой области и соответственно интенсивность усадочных перемещений расплава низки. Сохраняются условия для медленного роста зафиксированных на фронте твердо-жидкой области кристаллов. Сплав еще больше обогащается примесями. Сечение и глубина жидкоподвижной области уменьшаются, её границы со стороны вертикального фронта примерно соответствуют положению ближайших к оси слитка шнуров внеосевой неоднородности, выявляемых на серных отпечатках с продольных темплетов. Скорость двухфазного потока снижается в результате уменьшения градиента температуры в расплаве и увеличения его вязкости. Величины сил  $F_{\text{ус.к}}$  и  $F_{\text{к}}$  соизмеримы, и их соотношение изменяется по высоте затвердевающей области. Вследствие общей усадки сплава уровень расплава в прибыли снижается, тепловой центр слитка смещается в подприбыльную часть. При крайне низких скоростях зарождения и роста изолированных кристаллов сокращается объем выделяющихся в расплав ликватов. Это, наряду с повышением вязкости жидкости и снижением ско-

рости двухфазного потока, приводит к прекращению образование шнуров внеосевой неоднородности и одновременно развитию положительной ликвации.

На участке ниже зоны теплового влияния прибыли при малых скоростях двухфазного потока продолжается опережающее продвижение фронта твердо-жидкой области с образованием выступа. Двухфазный и обратный потоки разделяются на две замкнутые циркуляции – одна в прибыли и зоне её теплового влияния, другая в узком канале осевой зоны тела слитка. В застойной зоне между ними ( $F_k \rightarrow 0$ ) происходит быстрое смыкание вертикального фронта – формируется «первичный» мост.

Толщина его увеличивается за счет осаждения кристаллов из объема головной части слитка. Одновременно в связи с незначительной скоростью опускания мениска металла в прибыли, под твердой коркой на поверхности расплава зарождаются изолированные кристаллы, которые, погружаясь по всему его сечению жидкой фазы, нарушают установившееся движение двухфазного потока. Размеры оседающих на мост кристаллов мельче, чем на периферии подприбыльной области, так как погружение их происходит через расплав с повышенной температурой (через тепловой центр), что затрудняет их рост. Выделяющиеся в объем расплава ликваты не распределяются по границе твердо-жидкой области, а всплывают. В результате порции сплава, затвердевающие последними, сильно обогащаются ликвирующими элементами.

Под мостом в замкнутом протяженном объеме продолжается затвердевание расплава и опускание его поверхности вследствие усадки. На мениске расплава и вблизи его (скорости жидкости в вертикальном направлении равны нулю и минимальны) создаются наиболее благоприятные условия для присоединения изолированных кристаллов к фронту твердо-жидкой фазы ( $F_k = 0$ ). Начинается формирование «вторичного» моста. При этом одновременное опускание уровня расплава и продвижение твердо-жидкой области образуют конусообразную поверхность затвердевания – начинает формироваться усадочная раковина. «Вторичный» мост смыкается. Мениск расплава под ним опускается и процесс повторяется. Разрежение в усадочных пустотах вызывает приток в них обогащенного примесями расплава из прилежащих объемов твердо-жидкой области. Раковины частично заполняются ликватом, а вокруг них образуется рассредоточенная пористость. Эти процессы фиксируются в макроструктуре слитка как V-образный «рисунок». Образование «вторичных» мостов может неоднократно повторяться до полного затвердевания замкнутого объема расплава. Однако если мениск металла в незатвердевшей области опускается быстрее, чем происходит смыкание вертикального фронта, под «первичным мостом» образуется протяженная усадочная раковина (вторичная). Этот случай характерен для удлиненных слитков и непрерывнолитых заготовок. Толщина «вторичных» мостов в сравнении с «первичным» незначительна, поскольку в их образовании не участвуют оседающие кристаллы.

V-образная неоднородность располагается между «первичным мостом» и структурой, сформировавшейся за счет осаждения кристаллов и может быть предотвращена путем устранения прямой конусности фронта кристаллизации в теле слитка за счёт повышения конусности изложницы или экранирования последней в области ниже зоны теплового влияния прибыли [13].

### Выводы

Предложенная описательная модель позволяет связать образование структурных и макроликвационных дефектов с интенсивностью конвективного движения расплава при формировании слитка спокойной стали.

### Библиографический список

1. **Ефимов, В.А.** Разливка и кристаллизация стали / В.А. Ефимов. – М.: Металлургия, 1976. – 552 с.
2. **Левич, В.Г.** Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич. – М.: Физматгиз, 1959. – 669 с.
3. **Ефимов, В.А.** Влияние некоторых особенностей затвердевания на развитие химической и фи-

- зической неоднородности сплавов // Проблемы стального слитка: труды VI конференции по слитку. – М.: Metallurgy, 1976. С. 12–27.
4. **Сергеев, А.Б.** Вакуумный дуговой переплав конструкционной стали / А.Б. Сергеев, Ф.И. Швед, Н.А. Тулин. – М.: Metallurgy, 1974. – 192 с.
  5. **Пронов, А.П.** Кристаллизация стального слитка / А.П. Пронов. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 150 с.
  6. **Гуляев, Б.Б.** Затвердевание и неоднородность стали / Б.Б. Гуляев. – М.: Metallurgizdat, 1950. – 228 с.
  7. **Оно, А.** Затвердевание металлов / А. Оно. – М.: Metallurgy, 1980. – 152 с.
  8. **Саратовкин, Д.Д.** Дендритная кристаллизация / Д.Д. Саратовкин. – М.: Metallurgizdat, 1957. – 126 с.
  9. **Колосов, М.И.** Качество слитка спокойной стали / М.И. Колосов [и др.]. – М.: Metallurgy, 1973. – 408 с.
  10. **Гуляев, Б.Б.** Затвердевание и неоднородность слитка спокойной стали / Б.Б. Гуляев // Стальной слиток: сб. трудов первой научно-технической сессии по стальному слитку. – М.: Metallurgizdat, 1952. С. 21–39.
  11. **Горелкина, А.Е.** Определение периода кристаллизации рельсовых слитков массой 7–8 т / А.Е. Горелкина // Физико-химические и теплофизические процессы кристаллизации стальных слитков: труды II конференции по слитку. – М.: Metallurgy, 1967. С. 82–93.
  12. **Скребцов, А.М.** Изучение закономерностей кристаллизации уширенного книзу слитка спокойной стали методом радиоиндикаторов / А.М. Скребцов, Н.П. Васильковская // Теплофизика стального слитка: сб. трудов. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1980. С. 122–124.
  13. **Сенопальников, В.М.** Управление процессами затвердевания слитка спокойной стали / В.М.Сенопальников, Г.А. Лубенец, В.Л. Сивков; Нижегород. гос.техн. ун-т. 2009. – 128 с.
  14. **Попов, А.А.** Фазовые превращения в металлических сплавах / А.А. Попов. – М.: ГНГИ литературы по черной и цветной металлургии, 1963. – 311 с.
  15. **Скобло, С.Я.** Получение крупных слитков повышенной однородности / С.Я. Скобло [и др.] // Разливка стали и формирование слитка: труды I конференции по слитку. – М.: Metallurgy, 1966. С. 112–129.

*Дата поступления  
в редакцию 04.10.2011*

**V.M. Senopalnikov, V.L. Sivkov**

### **CONVECTION RELATION WITH INHOMOGENEITY DEVELOPMENT IN KILLED STEEL INGOT**

A mechanism connecting structural and liquation defects development in ingot of killed steel with convective movement of solidifying melt. Based on publications and personal research.

*Key words:* steel ingot, convection, structural inhomogeneity, liquation, velocity gradient, isolated crystals.