

УДК 669-412.54-162.001.5

В.М. Сенопальников, В.Л. Сивков, А.В. Титов

**ФОРМИРОВАНИЕ РАЗНООРИЕНТИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ
В СТАЛЬНОМ СЛИТКЕ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

На основании литературных данных и собственных исследований, предложен механизм, связывающий формирование зоны разноориентированных кристаллов и осевой V-образной неоднородности с конвективным движением затвердевающего расплава.

Ключевые слова: стальной слиток, конвекция, зона разноориентированных кристаллов, осевая V-образная неоднородность.

На основании существующих макрофизических теорий кристаллизации, а также данных собственных исследований, нами предлагается механизм образования разноориентированной структуры в центральных объёмах стального слитка спокойной стали. Данный механизм учитывает наличие сил, возникающих вследствие усадочного и конвективного перемещений расплава в двухфазной зоне.

По мере формирования зон «замороженных» и столбчатых кристаллов, из-за увеличения теплового сопротивления затвердевающей корки, охлаждения внутренних объемов расплава и нагрева изложницы, температурный градиент перед фронтом затвердевания и соответственно скорость нисходящего конвективного потока в расплаве уменьшаются. Течение вдоль поверхности охлаждения переходит из турбулентного режима в ламинарный, что подтверждается результатами исследований с помощью радиоактивных изотопов – скорость нисходящих потоков через некоторое время от начала затвердевания слитка снижается почти до нулевых значений [1].

Перенос примесей от фронта кристаллизации в расплав происходит только за счет молекулярной диффузии и интенсивность его в жидкой фазе в значительной мере снижается. Это приводит к повышению концентрации примесей в ликвационном слое на поверхности растущих столбчатых кристаллов и снижению температуры ликвидуса в нем – по терминологии, введенной А.Оно, на фронте затвердевания проявляется концентрационная депрессия термического переохлаждения (КДТП) [2]. «Область жидкой фазы оказывается изолированной от твёрдой фазы слоем повышенной концентрации примесей ...» [3].

В этом слое переохлаждение ($\Delta T_{\text{п}} - \Delta T_{\text{КДТП}}$) не достигает величины, необходимой для зарождения новых кристаллов, но остаётся достаточным для роста столбчатых дендритов:

$$\Delta T_{\text{р.к}} < \Delta T_{\text{п}} - \Delta T_{\text{КДТП}} < \Delta T_{\text{з.кр}}, \quad (1)$$

где $\Delta T_{\text{р.к}}$ и $\Delta T_{\text{з.кр}}$ – величины переохлаждения, достаточные для роста и для гетерогенного зарождения кристаллов.

За зоной КДТП выполняется условие:

$$\Delta T_{\text{п}} - \Delta T_{\text{КДТП}} > \Delta T_{\text{з.кр}}. \quad (2)$$

Термическое переохлаждение расплава достигает величин, необходимых для зарождения кристаллов на имеющихся активных примесях.

Одновременное выполнение условий (1) и (2) показывает, что на границе столбчатых кристаллов формируется переходная зона, где формы дендритов (столбчатых и разноориентированных) могут соседствовать.

Отвод теплоты кристаллизации от зарождающихся и растущих изолированных кристаллов к твердой фазе происходит теперь через пристенный слой расплава, повышая градиент температуры в нем и препятствуя расширению жидко-твердой зоны. Развитие последней начинается с более охлажденных придонных объемов, постепенно распространяясь вверх.

В поперечном сечении жидко-твёрдой фазы в пристенной области на изолированные кристаллы действуют силы, возникающие вследствие усадочных перемещений расплава $F_{у.к}$ и динамического давления F_k со стороны нисходящего вдоль вертикального фронта затвердевания потока.

Силы $F_{у.к}$ направлены к поверхности охлаждения и определяются как [4]:

$$F_{у.к} = - \int_0^{V_k} \text{grad } P_{у.к} dV_k,$$

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

Перед фронтом твердо-жидкой фазы (за зоной КДТП) переохлаждение расплава и его плотность максимальны. Соответственно максимум скорости нисходящего ламинарного конвективного потока (v_n) располагается за ликвационным слоем на незначительном расстоянии от границы раздела двухфазной зоны, определяемом её шероховатостью и вязкостью расплава. Далее скорость движения жидкости падает до нуля на границе с восходящим потоком. Изолированные кристаллы, образовавшиеся в переохлажденной области, погружаются в жидкости в связи с повышенной плотностью ($v_k > v_n$), причем скорость погружения увеличивается по мере удаления от фронта кристаллизации, так как менее переохлажденная жидкость имеет пониженную вязкость. Профиль величин скорости движения кристаллов относительного перемещающегося расплава имеет максимумы на линиях нулевых скоростей конвекции и минимум по линии максимальной скорости потока (рис. 1).

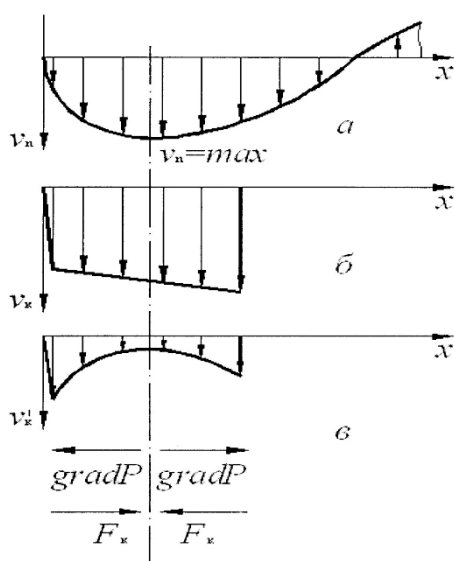


Рис. 1. Схема возникновения сил давления в нисходящем потоке расплава на изолированные кристаллы:

v_n – скорость потока расплава;
 v_k – скорость движения кристалла в потоке расплава;
 v'_k – скорость движения кристалла относительно расплава ($v'_k = v_k - v_n$)

Максимальное давление имеет место в зоне минимальной скорости. По сечению двухфазного потока возникает градиент давления ($\text{grad } P_k$) и силы перемещающие кристаллы (F_k):

$$\text{grad } P_k = \gamma v'_k dv'_k/dx; \quad F_k = - \int_0^V \text{grad } P_k dV,$$

где P_k – давление на изолированный кристалл со стороны нисходящего потока расплава; v'_k – скорость движения изолированных кристаллов относительного перемещающегося расплава, ($v'_k = v_k - v_n$).

Силы $F_{у.к}$ и F_k имеют противоположное направление (до линии максимальных ско-

ростей потока) и скорость переноса изолированных кристаллов к границе твердо-жидкой области определяется их соотношением.

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 $F_{\text{к}}$ направлены.

Наличие градиента скоростей в двухфазном потоке, а также различные размеры и скорости погружения изолированных кристаллов, приведут к их многочисленным столкновениям. Однако ликвационный слой на поверхности их осей и выделение теплоты кристаллизации в окружающую жидкую фазу препятствуют коагуляции.

Движение изолированных кристаллов и их пробег вдоль вертикального фронта затвердевания определяются векторной суммой скоростей вдоль оси слитка и нормально ей.

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. Это исключает смещение изолированных кристаллов по поверхности фронта твердо-жидкой фазы, способствует при их встрече с неподвижным дендритным каркасом разрушению ликвационного слоя на поверхности осей в зоне контакта и 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. Две последние величины в значительной мере зависят от содержания ликвирующих примесей в расплаве.

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 $F_{\text{ус.к}}$. В то же время интенсивность движения двухфазного (суспензионного) потока определяется в основном содержанием в нем кристаллов и изменяется незначительно [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 по его сечению ($F_{\text{к}}$) будут возрастать сверху вниз, снижаясь в придонной области перед поворотом.

Формирование зоны разноориентированной структуры можно условно разделить на три периода.

Начальный период (продолжается в интервале времени от появления жидко-твёрдой области до начала осаждения изолированных кристаллов). Этот период характеризуется интенсивным теплоотводом от слитка и соответственно значительными усадочными перемещениями расплава ($F_{\text{ус.к}} > F_{\text{к}}$).

Все кристаллы из жидко-твердой зоны переносятся к фронту затвердевания, а их «пробег» вдоль этого фронта и влияние на скорость нисходящего конвективного потока незначительны. Присоединяясь к фронту затвердевания, они блокируют рост столбчатых кристаллов сначала на отдельных участках, а затем и по всему фронту твёрдой фазы – формируется переходная область.

В придонных объёмах слитка интенсивное охлаждение расплава через поддон, а также малые скорости конвекции и соответственно конвективной диффузии с поверхности столбчатых кристаллов приводят к раннему проявлению КДТП и жидко-твердой области (рис. 2, а). Следствием этого является меньшие, чем на боковых гранях слитка, протяженность зоны столбчатых дендритов и переходной области.

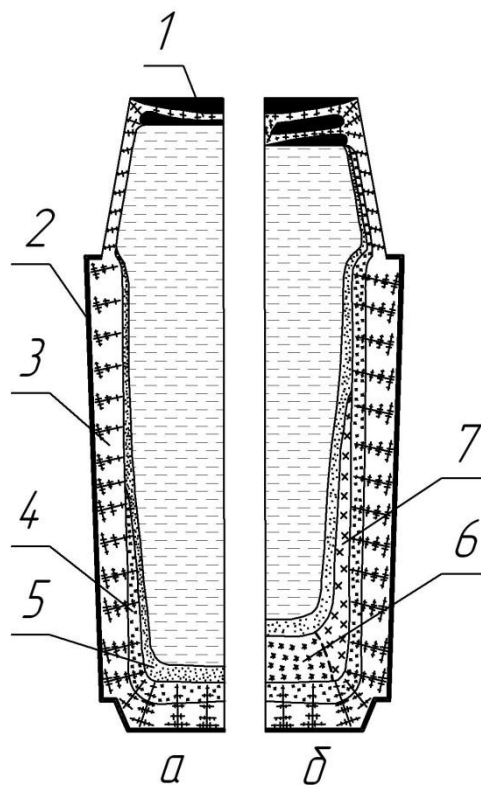


Рис. 2. Схема начального периода образования разнориентированной структуры:

а – начальный этап развития жидко-твёрдой области; *б* – формирование зоны смешанных кристаллов и обратной («заливочной») конусности границы раздела фаз; 1 – мост; 2 – зона «замороженных» кристаллов; 3 – зона столбчатых кристаллов; 4 – переходная зона смешанных кристаллов; 5 – жидко-твёрдая область; 6 – зона мелких кристаллов, зародившихся перед горизонтальным фронтом затвердевания (конус кристаллов); 7 – зона разнориентированных кристаллов, фиксируемых на вертикальном фронте затвердевания

Присоединение изолированных кристаллов, зарождающихся непосредственно перед донным (горизонтальным) фронтом кристаллизации, происходит под действием гравитации с минимальным пробегом, что ограничивает возможности их роста (рис. 2, б). Отвод теплоты кристаллизации происходит как в поддон, так и с восходящим, обратным двухфазному, потоком расплава, создавая благоприятные условия для зарождения изолированных кристаллов и одновременно для удаления выделяющихся из межосных пространств ликватов. Следствием этого процесса является обеднение придонных объемов углеродом, серой и фосфором. При этом понижение содержания ликвирующих элементов 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.

На стыке вертикального и горизонтального фронтов кристаллизации имеет место наиболее сильный теплоотвод. В то же 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 зоны формируется крупнокристаллическая, наличие которой отмечается в работе [5].

С течением времени жидко-твёрдая область распространяется в пристенном слое на всю высоту слитка.

В прибыльной надставке на мениске расплава теплоотвод излучением в окружающую среду приводит к образованию моста (рис. 2). В связи с постоянным опусканием уровня металла, жидко-твёрдая область под горизонтальным фронтом в головной части слитка в начальный период затвердевания не образуется. Разрежение, возникающее под мостом, приводит к его прогибу и, как правило, к прорыву. Температурный градиент перед вертикальным фронтом твердо-жидкой зоны, скорости продвижения последнего и конвекции, протяженность зоны термического переохлаждения расплава, объем зарождающихся изолированных кристаллов и усадочные перемещения расплава в прибыли минимальны. Это со-

здаёт благоприятные условия для медленного роста изолированных кристаллов после их присоединения к боковым стенкам.

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 от зоны теплового влияния прибыли до придонных объемов усадочные перемещения расплава переносят 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-твёрдой зоны происходит снизу вверх, толщина слоя присоединенных к вертикальной границе твердой фазы изолированных кристаллов увеличивается в том же направлении. Развивается обратная конусность вертикального фронта затвердевания (рис. 2, б).

Таким образом, в рассмотренный период затвердевания продвижение горизонтального фронта твердой фазы происходит последовательно, не смотря на зарождение кристаллов в объеме расплава, и, весьма вероятно, близко к 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).

Период осаждения изолированных кристаллов (рис. 3). В этот период и в дальнейшем теплоотвод от слитка к изложнице определяется в основном тепловым сопротивлением затвердевшего слоя сплава.

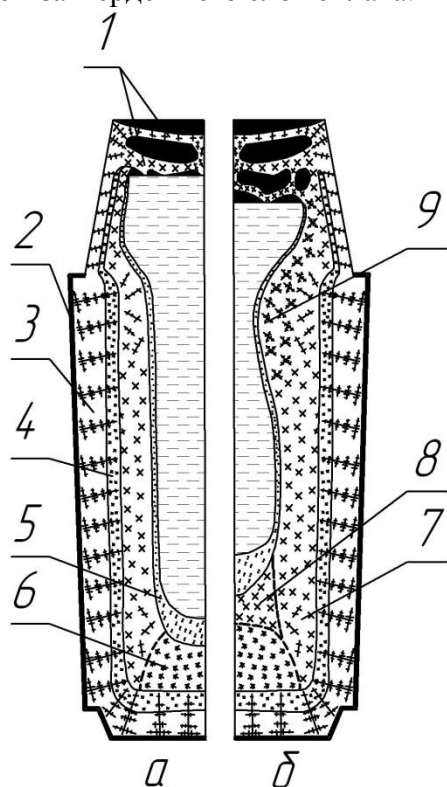


Рис. 3. Схема формирования структуры слитка в период осаждения изолированных кристаллов:
а – формирование разноориентированной структуры по всему фронту затвердевания; *б* – замыкание мелкокристаллической структурной зоны в донной части слитка осаждающимися кристаллами и опережающее продвижение фронта твёрдой фазы в верхней части изложницы; 1 – мост; 2 – зона «замороженных» кристаллов; 3 – зона столбчатых кристаллов; 4 – переходная зона смешанных кристаллов; 5 – жидко-твёрдая область; 6 – зона мелких кристаллов, зародившихся перед горизонтальным фронтом затвердевания (конус кристаллов); 7 – зона разноориентированных кристаллов, фиксируемых на вертикальном фронте затвердевания; 8 – зона осаждения кристаллов, зародившихся перед вертикальным фронтом затвердевания; 9 – опережающее продвижение твёрдой фазы в подприбыльной области слитка

Интенсивность усадочных перемещений расплава и соответственно скорость продвижения границы твердо-жидкой области уменьшаются. Состав расплава в этот период, по сравнению с исходным, обогащен ликвирующими элементами. Соотношение сил $F_{\text{ус.к}}$ и $F_{\text{к}}$ изменяется. Давление на изолированные кристаллы со стороны нисходящего потока расплава становится соизмеримо с давлением за счет его усадочных перемещений и тормозит их перенос 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 препятствуют развитию широкой жидко-твердой области, а также приводят к огрублению структуры. Одновременно, в связи с увеличением плотности суспензии по сравнению с расплавом в осевой части слитка, скорость течения образующегося двухфазного потока возрастает.

Преимущественный рост осей изолированных кристаллов в направлении теплоотода нарушает симметрию последних, приводит к смещению их центра тяжести и поворотам 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»).

В подприбыльной зоне в начале этого периода интенсивность зарождения изолированных кристаллов и частота их присоединения к границе твердо-жидкой области малы. В зоне теплового влияния прибыли рост кристаллов происходит в основном после присоединения их к дендритному каркасу.

Ниже зоны теплового влияния прибыли, в расширяющейся области переохлажденного расплава, идет активное зарождение изолированных кристаллов. По мере удаления от верха 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.

На участке торможения двухфазного потока, скорость продвижения вертикальной границы твердо-жидкой зоны за счет присоединения оседающих кристаллов больше, чем в вышележащей области. При этом вдоль вертикального фронта происходит образование «вала» по внешнему контуру горизонтального фронта твердо-жидкой фазы. Внутри образовавшегося «кратера осаждения»[6] продолжается процесс зарождения и присоединения к фронту твердо-жидкой фазы изолированных кристаллов. 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.

Поскольку тепловое сопротивление затвердевшего слоя в направлении поддона в этот период становится значительным, а рост дендритов в жидко-твёрдой области сопровождается выделением теплоты кристаллизации, то интенсивность зарождения твёрдой фазы перед горизонтальным фронтом затвердевания уменьшается.

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 ликвирующими примесями, 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 [7].

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 нисхо-

дящего потока продвижение фронта твердо-жидкой зоны замедляется. Толщина затвердевшего от стенки изложницы слоя по высоте слитка (ниже зоны теплового влияния прибыли) сначала выравнивается (рис. 3, *a*), а затем граница раздела фаз верхним краем постепенно наклоняется к оси слитка и в продольном сечении при малой обратной конусности изложницы (~2–6%) принимает Λ -образную, близкую к усеченному конусу форму (рис. 3, *б*).

Наличие прямой конусности фронта затвердевания четко зафиксировано путем выливания жидкой фазы слитков в работе [8] (рис. 4) и при исследовании с помощью радиоактивных изотопов затвердевания сортового слитка массой 8 т (рис. 5), залитого в уширенную к низу изложницу с теплоизоляционными вкладышами (прямая конусность 2,3%) [9].



Рис. 4. Серный отпечаток с осевого темплетта остова слитка массой 7 т рельсовой стали, полученного методом выливания жидкой серцевины через 90 мин после заливки

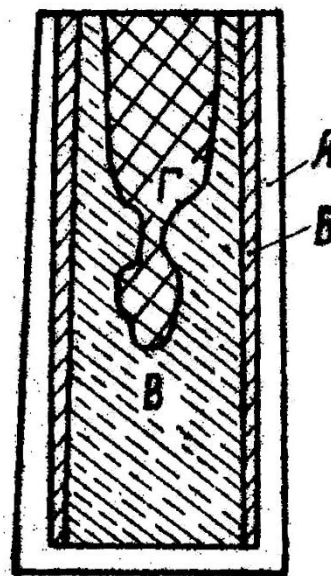


Рис. 5. Схема расположения областей в 8-тонном слитке спокойной стали с различной концентрацией изотопа:
 А – без изотопа; Б – 1-я добавка; В – 2-я добавка;
 Г – 3-я добавка

Период формирования осевой структуры и подприбыльного моста (рис. 6). Этот период характеризуется минимальными перегревом жидкой фазы, теплоотводом от слитка к изложнице и шириной зоны переохладения. 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 осевых 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.

Затвердевание головной части слитка идет при низкой скорости продвижения фронта твердо-жидкой зоны, имеющего теперь в продольном сечении форму, близкую к параболической или конической. При этом обеспечивается хорошее питание области моста. Вследствие общей усадки сплава уровень расплава в прибыли снижается, тепловой центр слитка смещается в подприбыльную часть.

На участке ниже зоны теплового влияния прибыли при малых скоростях двухфазного потока продолжается опережающее продвижение фронта твердо-жидкой области. Искривление потока при переходе от зоны влияния прибыли к нижележащему участку усиливает этот процесс за счет осаждения изолированных кристаллов. 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 (рис. 6, а). Толщина его увеличивается за счет осаждения кристаллов из объема головной части слитка.

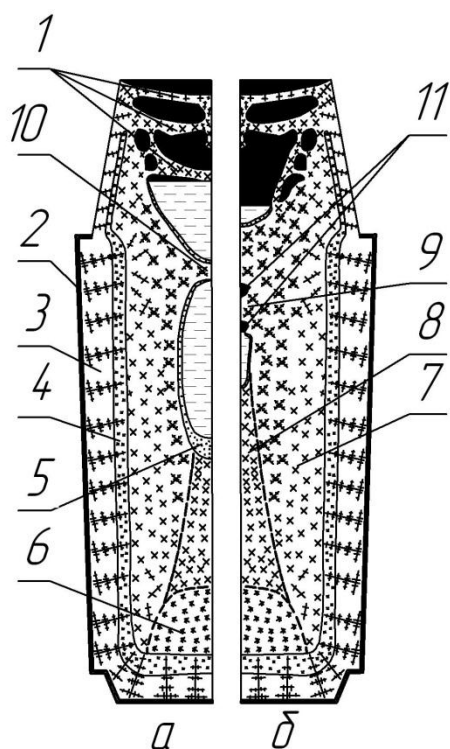


Рис. 6. Схема формирования осевой структуры и подприбыльного моста:

а - формирование подприбыльного моста; *б* - формирование V-образной неоднородности; 1 – мост; 2 – зона «замороженных» кристаллов; 3 – зона столбчатых кристаллов; 4 – переходная зона смешанных кристаллов; 5 – жидко-твёрдая область; 6 – зона мелких кристаллов, зародившихся перед горизонтальным фронтом затвердевания (конус кристаллов); 7 – зона разноориентированных кристаллов, фиксируемых на вертикальном фронте затвердевания; 8 – зона осаждения кристаллов, зародившихся перед вертикальным фронтом затвердевания; 9 – опережающее продвижение твёрдой фазы в подприбыльной области слитка; 10 – подприбыльный мост; 11 – усадочные V-образные дефекты

Под мостом образуется объем с замкнутой циркуляцией расплава. В нижней части этого объема ускоренному продвижению фронта затвердевания, наряду с усадочными перемещениями, способствует осаждение кристаллов. 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 твердой фазы. Начинается формирование «вторичного» выступа. 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 образования выступа и усадочной раковины повторяется (рис. 6, б). Разрежение в усадочных пустотах вызывает приток в них обогащенного ликвидами расплава из прилежащих объемов твердо-жидкой области. Раковины частично заполняются, 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. Однако если мениск металла в незатвердевшей области опускается быстрее, чем происходит смыкание вертикальных фронтов, под «первичным мостом» образуется протяженная усадочная раковина.

Толщина «вторичных мостов» значительно меньше, чем у «первичных», поскольку в их образовании практически не участвуют оседающие кристаллы.

Предложенный механизм позволяет удовлетворительно объяснить особенности строения зоны разноориентированных кристаллов в слитке за счет различной по высоте жидко-твердой области интенсивности переноса изолированных кристаллов к фронту затвердевания.

Библиографический список

1. **Ефимов, В.А.** Разливка и кристаллизация стали / В.А. Ефимов. – М.: Metallurgy, 1976. – 552 с.
2. **Оно, А.** Затвердевание металлов / А.Оно. – М.: Metallurgy, 1980. – 152 с.
3. **Саратовкин, Д.Д.** Дендритная кристаллизация / Д.Д. Саратовкин. – М.: Metallurgizdat, 1957. – 95 с.
4. **Левич, В.Г.** Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич. – М.: Физматгиз, 1959. – 669 с.
5. **Пронов, А.П.** Кристаллизация стального слитка/ А.П. Пронов. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 150 с.
6. **Попов, А.А.** Фазовые превращения в металлических сплавах / А.А. Попов. – М.: ГНГИ литературы по черной и цветной металлургии, 1963. – 311 с.
7. 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.
8. **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.
9. **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.

*Дата поступления
в редакцию 01.04.2014*

V. Senopalnikov, V. Sivkov, A. Titov

**THE FORMATION OF DIFFERENTLY ORIENTED PATTERNS
IN THE STEEL INGOT**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: To propose a mechanism linking the formation of a zone differently oriented crystals and axial V-shaped heterogeneity with the convective motion of a hardening melt.

Design/methodology/approach: On the basis of existing macro physical theories of crystallization, and your own research, we offer a mechanism of formation of differently oriented patterns in Central volumes of steel ingot quiet steel.

Findings: The proposed mechanism allows to explain satisfactorily is available zone differently oriented crystals in the ingot by means of various height-liquid-solid field intensity of migration isolated crystals to the front of solidification.

Research imitation/implications: The formation of a zone differently oriented structure can be divided into three periods.

Originality/value: This mechanism takes into account the availability of forces arising due to shrinkage and convective movements of the melt in the mushy zone.

Key words: steel ingot, convection zone differently oriented crystals, axial V - shaped heterogeneity.