

УДК 621.746.62:669.189

А.В. Гресс <sup>(1)</sup>, профессор, д.т.н.

О.Б. Исаев <sup>(1)</sup>, профессор, д.т.н.

О.А. Чеботарева <sup>(2)</sup>, аспирант

К. Ву <sup>(1)</sup>, директор института, профессор

С.А. Стороженко <sup>(2)</sup>, ст. преподаватель, к.т.н.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВВОДА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЛЕНТЫ В КРИСТАЛЛИЗАТОР СЛЯБОВОЙ МНЛЗ

<sup>(1)</sup> Уханьский университет науки и технологии, КНР

<sup>(2)</sup> Днепропетровский государственный технический университет

Розроблено математичну та чисельну моделі розрахунку тепло- та масообміну металевої ванни у кристалізаторі слябової МБЛЗ, якого оснащено заглибним стаканом с похилими розвантажувальними отворами. Досліджено теплові та гідродинамічні закономірності поведінки розплаву, в тому числі, під час подавання до кристалізатора інокулятора у вигляді металевої стрічки з хімічним складом, що відрізняється від базового, з можливою її осциляцією.

Ключові слова: безперервне розливання сталі, сляб, кристалізатор, рідкий метал, математичне моделювання

Разработаны математическая и численная модели расчета тепло- и массообмена металлической ванны в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ, оборудованном погружным стаканом с наклонными разгрузочными отверстиями. Исследованы тепловые и гидродинамические закономерности поведения расплава, в том числе, при подаче в кристаллизатор инокулятора в виде металлической ленты с химическим составом, отличным от базового, с возможной ее осцилляцией.

Ключевые слова: непрерывная разливка стали, сляб, кристаллизатор, жидкий металл, математическое моделирование.

There are worked out mathematical and numeral models for calculation heat- and mass-transfer of metallic bath in crystallizer of slab CCM, equipped by submersible tumbler with the sloping unloading openings. There are studied thermal and hydrodynamic conformities of melt action, including. carrying-in in crystallizer inoculator as a metallic band with chemical composition, different from base, with possible its oscillation.

Keywords: continuous casting of steel, slab, crystallizer, liquid metal, mathematical modeling

*Введение.* В настоящее время около двух третей непрерывнолитой стали разливают в слябовые заготовки. Вместе с тем, несмотря на столь большой объем выпускаемой продукции, остается еще достаточно много нерешенных проблем, связанных с получением качественной листовой заготовки при одновременном повышении скорости разливки и снижении материальных и энергетических затрат на изготовление металлопродукции.

Одним из прогрессивных способов непрерывной разливки, позволяющих решить вышеуказанную проблему, является использование различного вида инокуляторов [1-5]. В качестве инокуляторов используют металлические материалы, которые имеют сходный с разливаемым металлом состав. Наряду с достаточно редкими и слабо контролируемыми способами ввода инокуляторов (дробь, водоохлаждаемые холодильники, пруты) особое внимание заслуживает использование металлической ленты, являю-

щейся побочным продуктом производства листового проката.

Большинство дефектов непрерывнолитой заготовки зарождается в кристаллизаторе и определяется, главным образом, характером и интенсивностью тепло- и массообменных процессов. Поэтому, с точки зрения получения качественной заготовки при высокой производительности МНЛЗ, задача изучения процессов, происходящих в кристаллизаторах при непрерывной разливке стали, является весьма актуальной.

Особенно большое значение данный вопрос приобретает при вводе дополнительных материалов, в частности металлической ленты. При несоблюдении научно обоснованных рекомендаций по технологии и используемому оборудованию получение некачественной продукции или аварийное завершение работы МНЛЗ практически гарантировано.

*Анализ достижений и публикаций.* К наиболее интересным исследованием в этом направлении следует отнести работы [6,7]. В работе [6] задачу решали применительно к отливке тонких слябов на радиальной МНЛЗ. Были использова-

ны профессиональные пакеты программ расчета гидродинамики и теплопереноса «Fluent 5.5/- Gambit 1.3», основанные на RNG-k-ε модели турбулентности с учетом изменения энтальпии жидкого металла. Проверку адекватности осуществляли на физической модели.

В работе [7] решали совместную двухмерную модель тепломассообменных процессов в блюмовом кристаллизаторе МНЛЗ, в том числе, с подачей газа в струю металла. Проверку результатов расчетов выполняли на физической модели и в практических условиях.

К недостаткам данных работ следует отнести отсутствие возможности исследования скоростного и теплового полей при подаче стальной ленты в кристаллизатор. Однако модель, представленная в работе [7], прошедшая проверку на физической модели процесса разлива и в практических условиях, при ее преобразовании из двухмерной в трехмерную позволяет более уверенно, по сравнению с использованием платных пакетов программ, прогнозировать тепло- и массообменные процессы при разработке технологии ввода инокуляторов в слябовый кристаллизатор.

*Цель работы.* Разработка математической и численной моделей тепломассообменных процессов при вводе металлической ленты в кристаллизатор слябовой МНЛЗ.

*Методика исследований.* Модель построена на основе общего подхода к описанию многофазных систем, изложенного в работах [8,9]. При разработке модели предполагали:

- основной металл заданного химического состава разливают в слябовые заготовки через один погружной стакан, имеющий два боковые разгрузочные отверстия щелевидной формы, направленные под определенным углом к горизонтали к узким граням заготовки;

- металлическую ленту отличного от основного металла химического состава вводят в кристаллизатор вдоль его вертикальной плоскости и параллельно широкой грани на заданном расстоянии от погружного стакана;

- зеркало металла является ровным, без волн, и покрыто шлаком, то есть нет необходимости учитывать динамику свободной поверхности;

- со стороны кристаллизатора и ленты граница твердого металла и двухфазной зоны (ДФЗ) определяется условиями теплоотвода к кристаллизатору и ленте, а также зависит от скоростей омывающих их потоков металла.

В основу математической модели движения и теплопереноса жидкого металла в кристаллизаторе положены известные стационарные уравнения Навье-Стокса, неразрывности жидкого металла и теплопереноса:

$$(\vec{v}\nabla)\cdot\vec{v} = -\nabla p + \nu\cdot\Delta\vec{v} + g ; \quad (1)$$

$$\nabla\vec{v} = 0 ; \quad (2)$$

$$\nabla(\vec{v}\cdot T) = \nabla(\lambda\cdot\nabla T) + Q , \quad (3)$$

где  $\vec{v}$  – вектор скорости;  $p$  – давление жидкости;  $\nu$  – коэффициент эффективной кинематической вязкости;  $g$  – вектор, учитывающий действие массовых объемных сил (ускорение свободного падения и т.д.);  $T$  – температура жидкости,  $\lambda$  – теплопроводность металла,  $Q$  – объемный источник теплоты, учитывающий теплоту фазового перехода при кристаллизации металла.

Учитывая характер задачи, геометрию кристаллизатора достаточно аппроксимировать ортогональной неравномерной сеткой и использовать в уравнениях (1)-(3) декартову систему координат. Поскольку жидкий металл имеет различную плотность в зависимости от температуры, что приводит к естественной конвекции, при расчетах первого этапа в уравнении (1) использовали приближение Буссинеска [10], которое учитывает величину подъемной силы. При этом в уравнениях количества движения плотность считается неизменной величиной. Систему стационарных уравнений решали методом установления.

Таким образом, вектор скорости  $\vec{v}$  можно разложить на составляющие по осям OX, OY, OZ. Для удобства вывода уравнений (1) вводим нормированное давление  $\bar{p} = p/\rho$ . Выполняем замену величины  $Q$  в уравнении (3) эффективной теплоемкостью  $C_{эф}$ , которая учитывает выделение теплоты кристаллизации при затвердевании стали в интервале температур «ликвидус  $T_L$  – солидус  $T_S$ ». Вводим также дополнительное допущение, что металл в кристаллизаторе при температуре ниже температуры ликвидус теряет жидкоподвижность.

Граничными условиями для скорости на оси симметрии и у твердой поверхности выбираем условия непротекания и свободного скольжения:

$$v_{\perp}|_s = 0 ; \quad (4)$$

$$\vec{n}\cdot\vec{\nabla}_{\parallel}|_s = 0 , \quad (5)$$

а на свободной поверхности и в нижней части расчетной области – условие свободнотекущего потока:

$$v_{\perp}|_S = v_S, \quad (6)$$

где  $\vec{n}$  – вектор нормали к поверхности; значение параметра  $v_S$  принимает конечное значение скорости потока в месте его выхода из стакана, а на остальной поверхности металла равно нулю.

«Намерзание» корки металла рассчитывают на основе решения известного уравнения теплопроводности Фурье в приближении квазиравновесной ДФЗ:

$$C_{эф}(T) \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = -C_L \cdot \rho \cdot \vec{\nabla}(T \cdot \vec{v}) + \vec{\nabla}(\lambda \cdot \vec{\nabla}T), \quad (7)$$

где

$$C_{эф}(T) = \begin{cases} C_S, & T < T_S \\ C + \frac{L}{T_L - T_S}, & T_S \leq T \leq T_L \\ C_L, & T > T_L \end{cases}. \quad (8)$$

В уравнении (8):  $T$ ,  $T_L$ ,  $T_S$  – соответственно текущая температура расчетной области, температура «ликвидус» и температура «солидус»;  $C_{эф}$  – эффективная теплоемкость, зависящая от теплоемкости металла в твердом ( $C_S$ ), жидком ( $C_L$ ) и двухфазном состоянии ( $C$ ). В последнем случае эффективная теплоемкость равна

$$C = \frac{(C_L - C_S) \cdot T}{T_L - T_S} + \frac{C_S \cdot T_L - C_L \cdot T_S}{T_L - T_S}. \quad (9)$$

Поставленную задачу решали численно в естественных переменных методом расщепления по физическим факторам [11], который в наших условиях реализован в виде трехэтапной схемы расщепления, являющейся комбинацией метода расщепления по физическим факторам для уравнения гидродинамики и пересчетной разностной схемы:

1 этап

$$\vec{v} = \vec{v} + \Delta\tau \cdot \left[ v \cdot \Delta\vec{v}^n - (\vec{v}^n \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{v}^n \right], \quad (10)$$

$$\vec{T} = T^n - \nabla\tau \cdot C \cdot \rho_l \cdot \vec{\nabla}(T^n \cdot \vec{v}^n). \quad (11)$$

2 этап

$$\Delta\vec{p}^{n+1} = \frac{\vec{\nabla} \cdot \vec{v}}{\Delta\tau}. \quad (12)$$

3 этап

$$\vec{v}^{n+1} = \vec{v} - \Delta\tau \cdot \vec{\nabla}\Delta\vec{p}^{n+1}; \quad (13)$$

$$T^{n+1} = T^n + \Delta\tau \cdot \vec{\nabla}(\lambda_l \cdot \vec{\nabla}\vec{T}), \quad (14)$$

где  $n$  – номер временного слоя;  $\tau$  – шаг по времени;  $\lambda$ ,  $\rho$  – теплопроводность и плотность жидкого металла, соответственно.

Следует отметить, что этап 2 выполняют только в жидкой фазе.

Краевые условия для давления в границах расчетной области получают посредством проектирования (13) на нормаль к поверхности.

В тепловой части расчета на оси симметрии модели принимается условие отсутствия теплообмена. Теплообмен на поверхности шлака задается условиями лучисто-конвективного теплообмена. В месте входа струи металла в кристаллизатор принимается заданная температура перегрева.

На поверхности кристаллизатора задают граничные условия первого рода в виде степенной зависимости, полученной посредством статистической обработки соответствующих литературных данных:

$$T_S = T_f + (T_i - T_f)^{1 - \frac{v_c}{l_{cr}}}, \quad R = 0,95, \quad (14)$$

где  $T_i$ ,  $T_f$  – соответственно, температура заливки металла в кристаллизатор и поверхности заготовки на выходе из него;  $v_c$  – скорость разливки;  $l_{cr}$  – длина кристаллизатора;  $R$  – коэффициент множественной корреляции.

Ввиду малой толщины ленты с целью уменьшения времени численного эксперимента использовали расчетную сетку с переменным шагом.

Представленная математическая модель реализована в среде «Delphi 7.0». При выполнении численных экспериментов моделирование ввода ленты осуществляли при стабилизации тепловой и гидродинамической обстановки во время непрерывной разливки. Адекватность модели проверяли посредством сравнения полученных расчётных значений с данными физического моделирования и практических экспериментов [12].

*Результаты исследований.* Исследовали процессы тепло- и массообмена в кристаллизаторе сечением 2300 x 300 мм и длиной 0,90 м. Моделировали разливку стали марки S355, перегретую на входе в кристаллизатор на 15 °С. Расстояние от мениска металла до оси разгрузочных окон погружного стакана составляло 150 мм, угол наклона выходных сопел – 15 градусов вниз к горизонтали. Скорость разливки принимали равной 0,90 м/мин, а температуру поверх-

ности заготовки на выходе из кристаллизатора - 1150 °С.

Металлическая лента имела химический состав, аналогичный марке стали Ст45. Толщина ленты составляла 1,50 мм, ее ширина – 400 мм. Расстояние от оси погружного стакана до торца ленты принято равным 200 мм, скорость ввода инокулятора в показательных расчетах – 5 м/мин. Начальную температуру ленты полагали равной 20 °С. Исследовали тепло- и массообменные процессы в кристаллизаторе при спо-

койной подаче ленты и с наложением на нее поперечных осцилляций частотой 150 Гц и амплитудой 2,0 мм.

На рис. 1 показаны изоповерхности абсолютных значений скоростей потоков металла (здесь и далее соответствуют скоростям 0,06, 0,15, 0,30 и 0,55 м/с) при отсутствии ввода инокулятора. Очевидно, что в этом случае в объеме металла возникают два симметричных относительно погружного стакана потока, направленные к узким граням заготовки и вниз по криволинейной траектории.

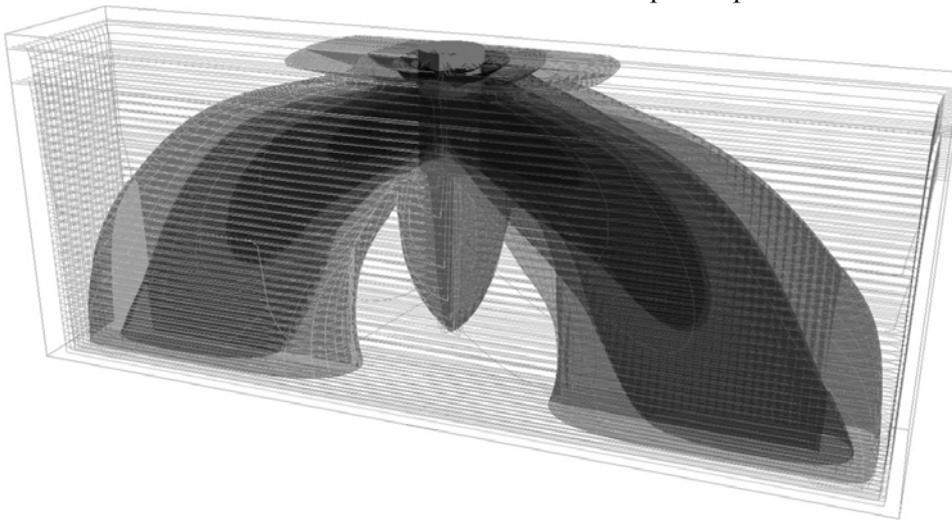


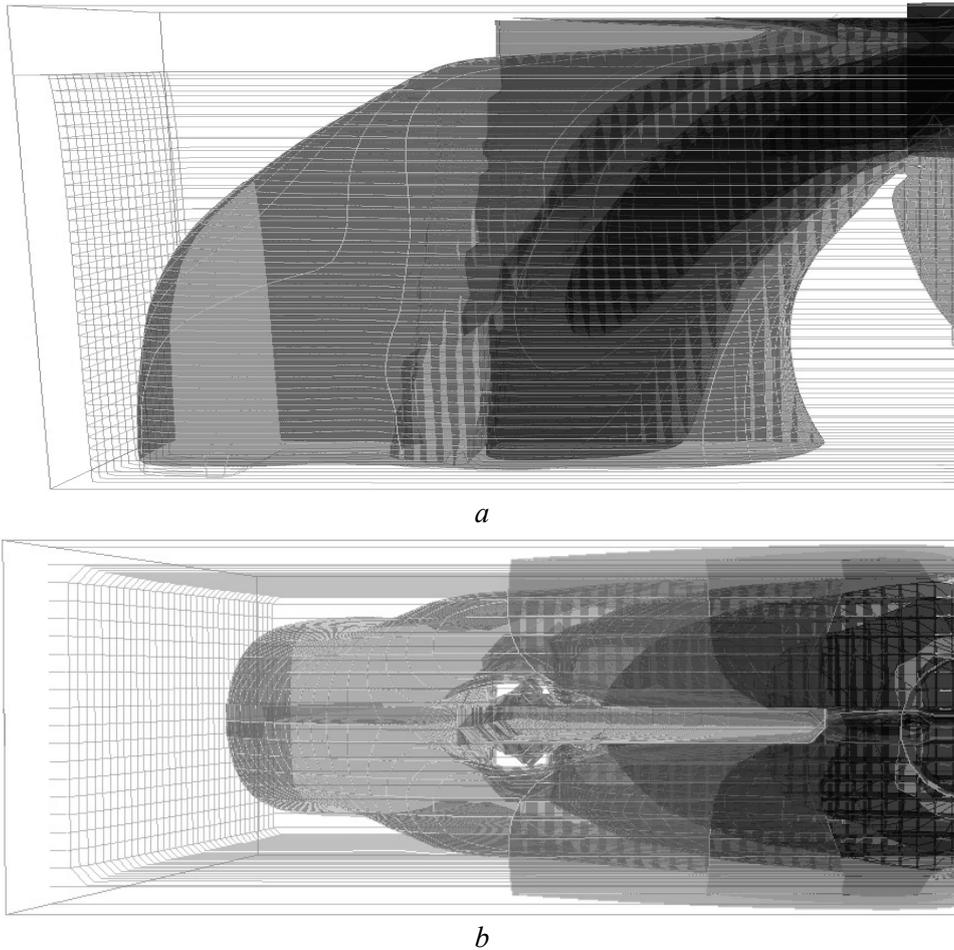
Рисунок 1 – Гидродинамика металла в кристаллизаторе без подачи ленты

Детальный анализ полученных результатов показал, что в продольном осевом сечении под ниспадающими потоками металла образуются замкнутые, вытянутые по ходу вытягивания заготовки, вихри. По направлению к широким стенкам кристаллизатора их интенсивность снижается и имеется тенденция приближения к разгрузочным отверстиям. В поперечном сечении объема кристаллизатора наблюдается более сложная картина. Если потоки металла в верхних слоях направлены к погружному стакану и под некоторым углом вниз, то, по мере роста глубины металла, скорости меняют свое направление, приводя к возникновению замкнутых и распространяющихся под переменным углом к вертикали вихрей, способствующих диссипации энергии струи металла, истекающей из разгрузочных отверстий погружного стакана.

На глубине металла ниже верхней кромки разгрузочных отверстий потоки направлены к узким граням кристаллизатора, исключая облас-

ти, прилегающие к поверхностям данных граней. Здесь потоки, в результате взаимодействия с потоками, отраженными от стенок кристаллизатора, перенаправляются к мениску металла. В то же время, у погружного стакана появляются короткозамкнутые вихри, способствующие снижению скорости кристаллизации металла в локальных зонах широкой грани. В дальнейшем, данные вихри теряют свою интенсивность и температуру, что способствует росту скорости затвердевания в означенных локальных зонах и выравниванию толщины затвердевшей корки по периметру кристаллизатора. Течение металла ламинизируется и короткозамкнутые вихри наблюдаются лишь в углах кристаллизатора.

На рис. 2 представлена картина поведения твердой и жидкой фаз при вводе ленты без наложения колебаний (с целью большей наглядности толщина ленты здесь и далее визуальнo увеличена).

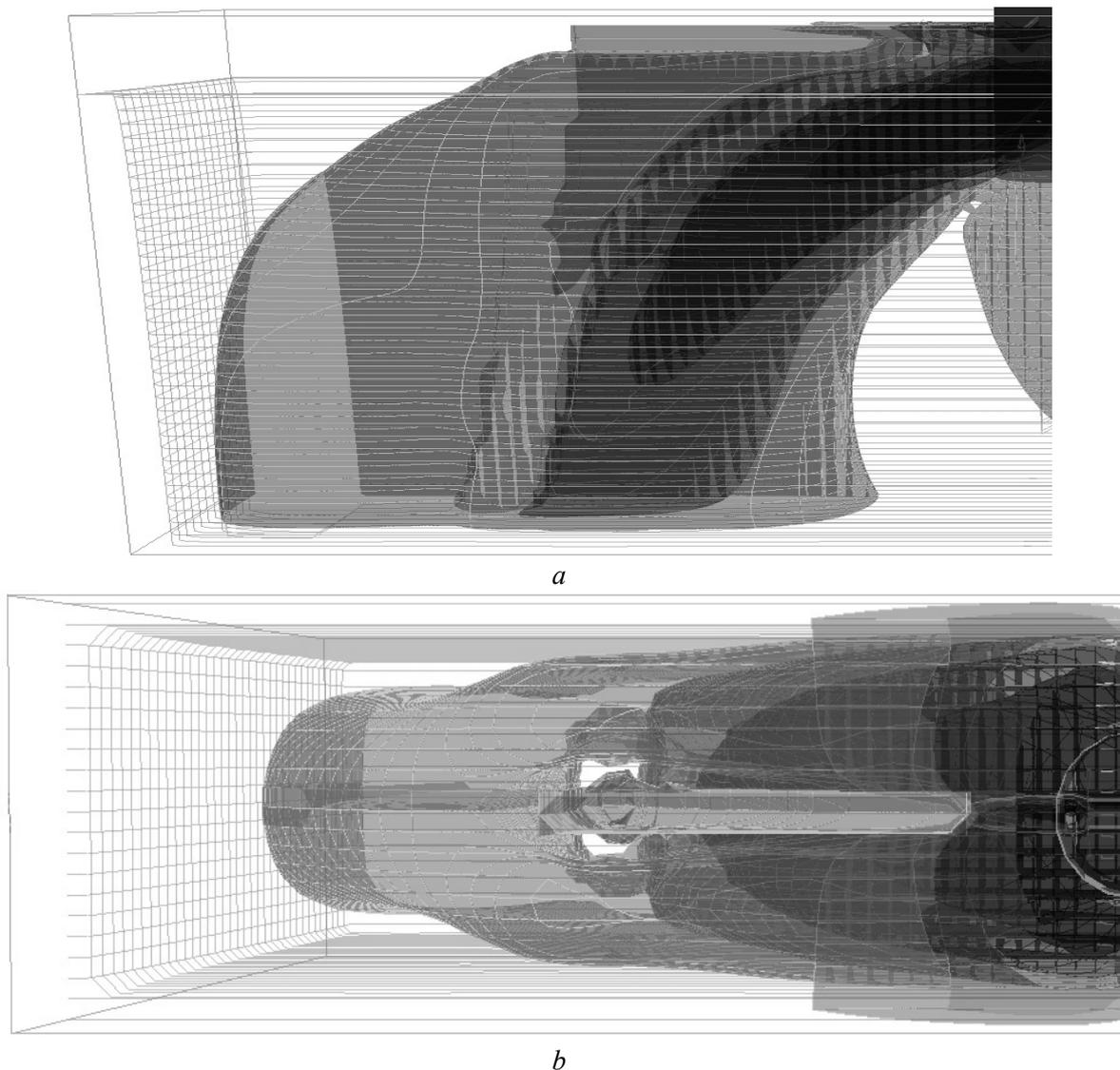


**Рисунок 2** – Гидродинамика металла и положение твердой фазы в кристаллизаторе с подачей ленты без осцилляции в половине объема кристаллизатора: *a* – фронтальный вид; *b* – вид в плане

В результате ввода ленты поток жидкого металла раздваивается на два симметричных с сохранением тенденции образования вихрей в области между лентой и погружным стаканом аналогично предыдущему случаю. Высокие скорости потоков металла и его температура приводят к подплавлению приосевых областей ленты с образованием границы раздела фаз, соответствующей изоповерхностям со скоростями потоков сплава ниже 0,10 м/с. В результате охлаждающего эффекта материала ленты на ее поверхности практически от мениска металла вглубь расплава образуется твердая корка из стали базового состава. Толщина корки возрастает до глубины около 0,30 м, а затем постепенно уменьшается до нуля. Вместе с тем, на поверхности ленты образуется и несмываемый малоподвижный двухфазный слой базового металла, а также металла инокулятора, толщина которого

возрастает в экспоненциальной зависимости по всей глубине кристаллизатора. По мере удаления от оси кристаллизатора толщина корки на ленте вначале растет, а затем уменьшается до нуля. Это приводит к реорганизации потоков жидкости и перенаправлении их к широким стенкам кристаллизатора, вызывая тем самым более интенсивное их воздействие на слои твердого металла, кристаллизующиеся на стенках. В результате скорость роста оболочки заготовки в этих зонах замедляется в большей степени, чем в предыдущем случае. Установлено, что, в среднем, толщина затвердевшей корки по периметру нижнего сечения кристаллизатора выше, чем при отсутствии ввода охладителя.

Визуализация расчетных данных, полученных при численном моделировании процесса ввода ленты с осцилляцией, приведена на рис. 3.



**Рисунок 3** – Гидродинамика металла и положение твердой фазы в кристаллизаторе с подачей ленты с осцилляцией в половине объема кристаллизатора: *a* - фронтальный вид; *b* - вид в плане

Наложение на ленту вынужденных колебаний приводит к некоторому изменению тепло- и гидродинамической обстановки в объеме кристаллизатора. В частности, в поверхностных слоях возникают потоки металла, направленные к узким граням кристаллизатора, что, безусловно, ввиду большей теплоотдачи к его стенкам, приводит к повышению скорости охлаждения сплава при некотором уменьшении толщины замороженной корки по сравнению с предыдущими случаями.

Уменьшение толщины корки металла базового состава, наростшей на ленте, ввиду роста интенсивности теплообмена с жидким металлом, вызванного осцилляцией ленты, обеспечивает беспрепятственное проникновение горячих порций металла в торцевые зоны кристаллизатора и стабилизирует его тепловое состояние.

Это способствует увеличению и выравниванию скоростей роста оболочки заготовки по ее периметру. Установлено, что при использовании режима осцилляции вводимой ленты скорость ее плавления возрастает на 35 %.

*Выводы.* С помощью разработанных математической и численной моделей процесса непрерывной разливки слябовой заготовки исследованы тепло- и массообменные процессы в кристаллизаторе при наличии погружного стакана с наклонными разгрузочными отверстиями и, в том числе, устройством подачи инокулятора в виде ленты и возможной ее осцилляции. Найденные закономерности поведения жидкого металла позволили определить, что подача ленты заданной толщины и химического состава, скоростью ввода, осцилляции и амплитуды улучшают тепловое и гидродинамическое состояние

жидкой ванны при одновременном увеличении толщины корки заготовки по периметру на выходе из кристаллизатора. Модель может быть

использована для любых типоразмеров слябовых кристаллизаторов и марок разливаемых сталей.

### Библиографический список

1. **Naveau, P.** Production of high quality semis by steel powder addition during CC / P. Naveau, C. Marique [Текст] // 3<sup>rd</sup> European Continuous Casting Conference Proceedings. Madrid, Spain. – 1998. – P. 425-433. – Bibliog.: p. 432-433.
2. **Naveau, P.** An original casting technique an enhanced control on the composition and structure of steel semis [Текст] / P. Naveau, C. Marique // 4<sup>th</sup> European Continuous Casting Conference Proceedings. Birmingham, UK. – 2002. – P. 94-103. – Bibliog.: p. 102-103.
3. **Fredriksson, H.** Mechanism of transition from columnar to equiaxed zone in ingots [Текст] / H. Fredriksson, A. Olsson // Mater. Sci. Technol. – 1986. – P. 508-516. – Bibliog.: p. 515-516.
4. **Скворцов, А. А.** О применимости водоохлаждаемых виброхолодильников при непрерывной разливке стали [Текст] / А. А. Скворцов, Л. А. Соколов, В. А. Улянов // Известия АН СССР. Металлы. – 1980. – № 1. – С. 36-42. – Библиогр.: с. 42.
5. **Паршин, В. М.** Улучшение качества непрерывнолитого слитка при разливке с погружными водоохлаждаемыми холодильниками [Текст] / В. М. Паршин, А. М. Поживанов, В. П. Клак и др. // Сталь. – 1985. – № 4. – С. 16-19. – Библиогр.: с. 19.
6. **Олер, К.** Цифровое моделирование процессов течения и затвердевания металла в МНЛЗ для литья тонких слябов / К. Олер, Х.-Ю. Оденталь, Г. Пфайфер, И. Леманович // Черные металлы. – 2002. – № 3. – С. 22-30. – Библиогр.: с. 29-30.
7. **Огурцов, А. П.** Непрерывное литье стали [Текст] / А. П. Огурцов, А. В. Гресс. – Днепропетровск : Системные технологии, 2002. – 675 с. – Библиогр.: с. 651-674.– 300 экз. – ISBN 966-7316-67-X.
8. **Огурцов, А. П.** Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатофазних середовищах [Текст] / А. П. Огурцов, С. Є. Самохвалов – Київ : Наукова думка, 2001. – 409 с. – Бібліогр.: с. 393-406. – 300 экз. – ISBN 966-00-0724-8.
9. **Огурцов, А. П.** Тепломассообменные процессы финишных операций обработки стали. В двух книгах. Книга 2. Тепломассообменные процессы при разливке стали на МНЛЗ [Текст] : А. П. Огурцов, И. А. Павлюченков, А. В. Гресс, Ф. В. Недопекин. – Днепродзержинск : ДГТУ, 2007. – 307 с. – Библиогр.: с. 286-304. – 300 экз. – ISBN 966-8551-45-1.
10. **Полежаев, В. И.** Математическое моделирование конвективного тепломассообмена на основе уравнений Навье-Стокса [Текст] / В. И. Полежаев, А. В. Бунэ, Н. А. Верезуб и др. – Л. : Наука, 1987. – 272 с. – Библиогр.: с. 256-268. – 500 экз.
11. **Марчук, Г. И.** Методы расщепления для решения нестационарных задач [Текст] / Г. И. Марчук // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1995. – Т. 35, № 6. – С. 843–849. – Библиогр.: с. 848-849.
12. **Исаев, О. Б.** Создание комплексной технологии улучшения внутреннего строения непрерывнолитого сляба из низколегированных сталей [Текст] : дис. д-ра техн. наук: 05.16.02: защищена 22.03.2010: утв. 08.04.2011 / Исаев Олег Борисович. – Москва, 2010. – 377 с.

Стаття надійшла до редакції 27.11.2015 р.  
Рецензент, проф. С.Є. Самохвалов

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука  
<http://www.zgia.zp.ua>