

Горнаков А. И.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА

ПРИ НОВОМ СПОСОБЕ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

Горнаков А. И.

A.I. Gornakov

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА
ПРИ НОВОМ СПОСОБЕ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ***

**MATHEMATICAL MODELING OF METAL FLOW UNDER THE NEW METHOD OF
CONTINUOUS CASTING OF STEEL**

Горнаков Антон Игоревич – аспирант Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: gornakovai@mail.ru.

Mr. Anton I. Gornakov – PhD Candidate, Institute of Engineering and Metallurgy, the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: gornakovai@mail.ru.

Аннотация. В работе построена пространственная математическая модель, описывающая гидродинамику жидкого металла при разливке стали в кристаллизатор установки непрерывной разливки стали (УНРС). Получены поля скоростей внутри кристаллизатора прямоугольного сечения при использовании новой конструкции разливочного стакана с отражателем. Математическая модель данного процесса поможет получить новую схему движения разливаемого металла и рассмотреть её влияние на теплоотвод.

Summary. In this paper a mathematical model is built, which describes the hydrodynamics of liquid metal during casting of steel into the mold of a steel continuous casting plant. We obtained the velocity field inside the mold of rectangular cross-section using a nozzle of new design with reflector. A mathematical model of this process will help to get a new pattern of flow of the spilled metal, and to consider its effect on the heat sink.

Ключевые слова: численное моделирование, гидродинамика, жидкий металл, кристаллизатор, УНРС.

Key words: numerical modelling, hydrodynamics, liquid metal, mold, steel continuous casting plant.

УДК: 519.677

Введение

Важной составляющей улучшения технологии непрерывной разливки стали является оптимизация устройств подвода расплава в кристаллизатор, в основном погружных стаканов. В данной работе рассмотрено устройство подвода, состоящее из разливочного стакана и отражателя под ним.

Установка непрерывной разливки стали (УНРС) при использовании исследуемого способа подвода расплава в кристаллизатор работает следующим образом (см. рис. 1). Расплавленный металл движется по каналу разливочного стакана 3 из промежуточного ковша 1 в полость кристаллизатора 2. Жидкий металл на выходе из стакана 3 под действием пластины 4, установленной под стаканом при помощи держателей 5 на некотором расстоянии от кромки выходного отверстия разливочного стакана, течет с образованием вихрей, которые переносят зарождающиеся центры кристаллизации от охлаждаемой стенки кристаллизатора в центр слитка. Образующийся слиток вытягивается вниз.

Благодаря тому, что установка оснащена пластиной, установленной под выходным отверстием прямого стакана, поток металла отражается во все стороны, и образуются дополнительные вихри в расплаве в плоскости, параллельной узкой стенке кристаллизатора.

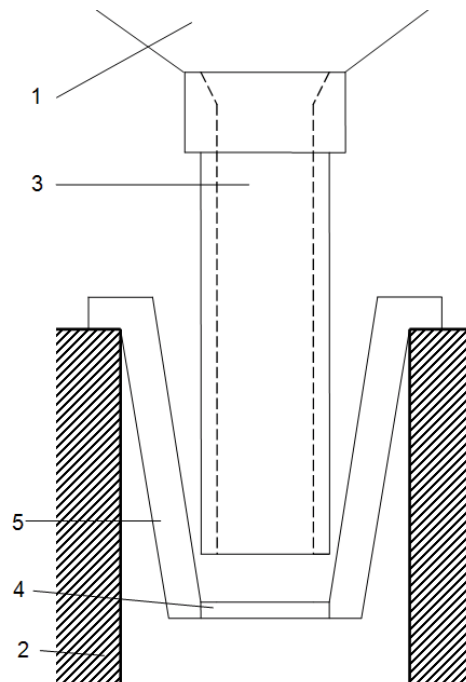


Рис. 1. Разливка с использованием разливочного стакана с отражателем

Вследствие этого усиливается течение возле широкой стенки кристаллизатора и вихрь уносит зарождающиеся центры кристаллизации от охлаждаемой стенки в центр слитка. Из-за возрастания количества центров кристаллизации в слитке увеличивается его мелкозернистость. Это положительно сказывается на некоторых физико-механических свойствах, например, ударной вязкости и твердости слитка и последующего проката.

Постановка задачи

В целях упрощения решения задачи погружной стакан примем квадратного поперечного сечения и пренебрежем влиянием нарастающей корочки на геометрию расчетной области. Толщина корочки в нижней части кристаллизатора составляет 15 – 20 мм, а поперечное сечение кристаллизатора 2000×250 мм. Тогда с учетом двухплоскостной симметрии формализованная геометрия расчетной области может быть представлена в виде, представленном на рис. 2, то есть будем рассматривать четвертую часть области течения жидкого металла. Поверхности Γ_6, Γ_9 – это плоскости симметрии.

Процесс примем стационарным. Среду (жидкий металл) будем считать несжимаемой. Исходя из сформулированных допущений, запишем систему дифференциальных уравнений в декартовой системе координат.

Для несжимаемой жидкости ($\rho = \text{const}$) и стационарного течения ($\partial v_i / \partial \tau = 0$) имеем следующую систему уравнений гидродинамики:

- закон количества движения

$$F_i^* - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 v_i = \rho v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k}, \quad F_2^* = F_3^* = 0, \quad i, k = 1, 2, 3; \quad (1)$$

- уравнения несжимаемости

$$v_{i,i} = 0, \quad i = 1, 2, 3. \quad (2)$$

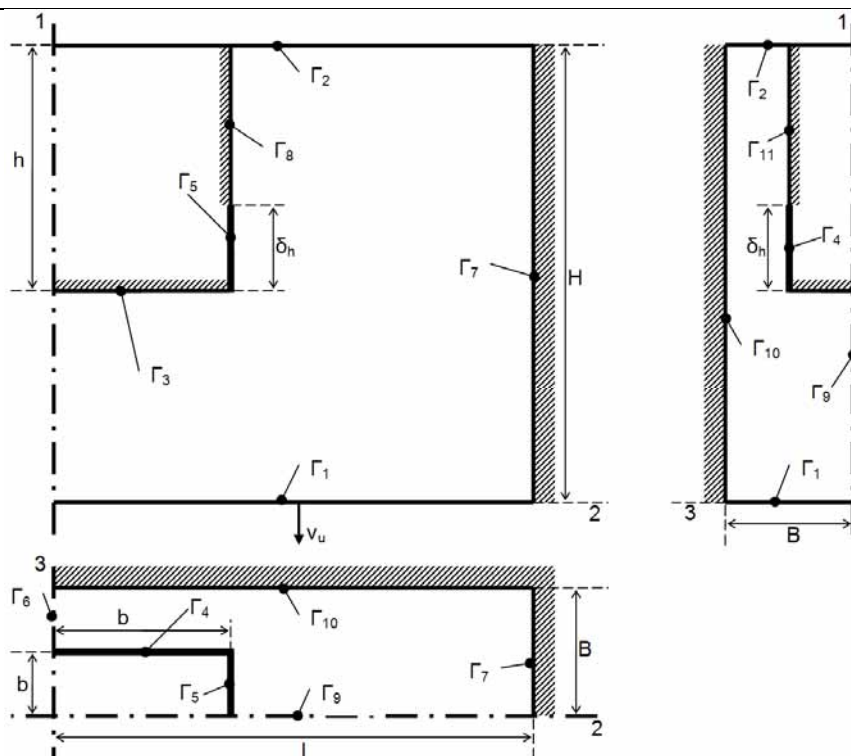


Рис. 2. Формализованная геометрия расчетной области

Здесь p – давление в данной точке ($p = -\sigma$); σ – гидростатическое напряжение; μ – коэффициент вязкости, $\text{г}\cdot\text{с}/\text{см}^2$; v_i – проекции скоростей перемещений по координатным осям x_i ($i = 1, 2, 3$); ρ – плотность жидкого металла; F_i^* – проекция удельной объемной силы тяжести на координатные оси x_i ($i = 1, 2, 3$); τ – время; ∇^2 – Лапласа оператор; в формулах (1) – (2) используется суммирование по повторяющимся индексам.

Уравнения (1), (2) описывают течение ньютоновской вязкой несжимаемой жидкости, для которой справедливы уравнения

$$\sigma_{ij,j} + F_i^* = I_i^*, \quad I_i^* = \rho \left(\dot{v}_i + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right). \quad (3)$$

$$\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2\mu \xi_{ij}, \quad \xi_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}). \quad (4)$$

$$v_{j,j} = 0, \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (5)$$

Здесь σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; ξ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций; δ_{ij} – символ Кронекера. Для стационарного процесса

$$\dot{v}_i = \frac{\partial v_i}{\partial \tau} = 0, \quad i = 1, 2, 3.$$

Переход от системы (1), (2) к системе (3)-(5) выполнен, чтобы воспользоваться апробированным численным методом [1] который применялся в работах [2-4] и др., разработанным для решения подобных систем уравнений.

Граничные условия задачи

$$\sigma_{11}|_{\Gamma_2} = -p_1; (\sigma_{12} = \sigma_{13})|_{\Gamma_2} = 0; (\sigma_{12} = \sigma_{13})|_{\Gamma_i} = 0, i = 1..4;$$

$$(\sigma_{21} = \sigma_{23})|_{\Gamma_i}, i = 5..8; (\sigma_{31} = \sigma_{32})|_{\Gamma_i}, i = 9..11;$$

$$v_1|_{\Gamma_1} = v_u; v_1|_{\Gamma_3} = 0; v_2|_{\Gamma_i} = 0, i = 6..8;$$

$$v_3|_{\Gamma_4} = \bar{v}^*; v_2|_{\Gamma_5} = \bar{v}^*; v_3|_{\Gamma_i} = 0, i = 9..11;$$

Здесь v_u – скорость вытягивания слитка (см. рис. 2); \bar{v}^* – скорость выхода жидкого металла из окон погружного стакана Γ_4, Γ_5 .

Задавались следующие геометрические параметры рассматриваемой четверти существующего кристаллизатора: $H = 100$ см, $B = 12,5$ см, $l = 100$ см, $h = 20$ см, $b = 7,5$ см, $\delta_h = 1,5$ см. Принимались $\bar{v}_1^* = 1,36$ м/с, $v_u = 1$ м/мин.

Коэффициент вязкости μ принимался по работе [6], $\mu = 2,1 \cdot 10^{-4}$ кг·с/м².

Результаты расчета

На рис. 3 – 4 представлены некоторые результаты расчета. На рис. 3 приведены течения потока металла в сечении Γ_9 . На рис. 4 дано движение потока в сечении Γ_6 , верхняя часть кристаллизатора показана увеличенно.

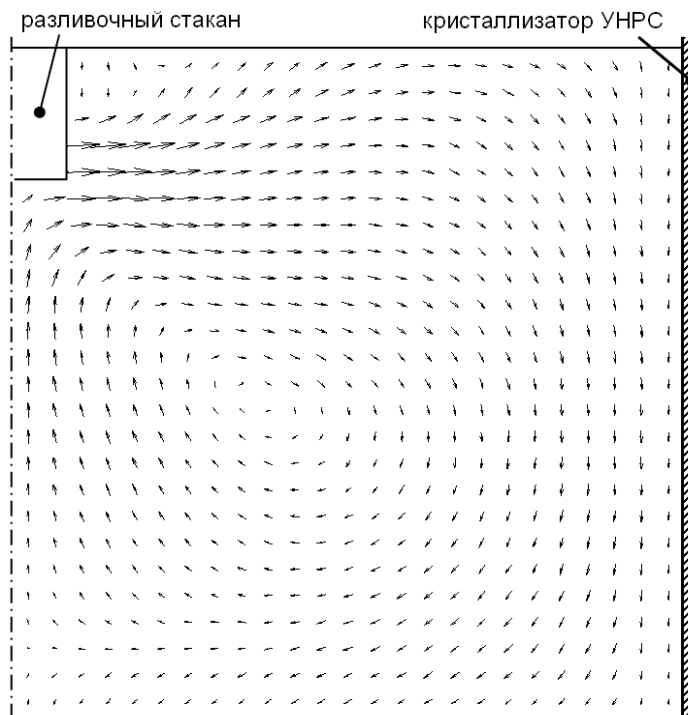


Рис. 3. Поле скоростей в сечении Γ_9

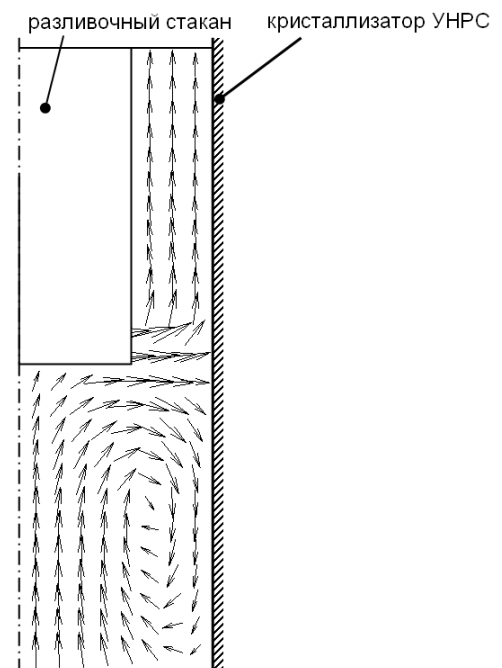


Рис. 4. Поле скоростей в сечении Γ_6

Как видно из рисунков, ниже кристаллизатора наблюдается круговое течение металла. Оно просматривается в обеих плоскостях симметрии Γ_9 , Γ_{10} (см. рис. 3, 4).

Ввиду малости коэффициента μ по каждому элементу, получили $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} = \sigma$, которые распределены по области в соответствии с глубиной нахождения элемента. Только в области выхода струи из погружного стакана наблюдается небольшой всплеск давления, превышающий на 0,04 атм. давление на данном уровне. Этот всплеск быстро уменьшается вдоль координаты x_2 .

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 11-01-98500-р_восток_a.

ЛИТЕРАТУРА

1. Математическое моделирование сложных технологических процессов: моногр. / В. И. Одинок, Б. Г. Каплунов, А. В. Песков, А. А. Баков. – М.: Наука, 2008. – 176 с.
2. Одинок, В. И. Построение математической модели для анализа процесса разрушения ледяного покрова / В. И. Одинок, А. М. Сергеева, Е. А. Захарова // Математическое моделирование. – 2008. – Т. 20. – № 5. – С. 15-26.
3. Одинок, В. И. Моделирование процесса разрушения ледяных заторов / В. И. Одинок, А. Н. Прокудин // ПМТФ. – 2010. – Т. 51. – № 1. – С. 110-116.
4. Одинок, В. И. Моделирование процесса деформации металла на литейно-ковочном модуле / В. И. Одинок, Н. С. Ловизин, С. Ю. Склад // Математическое моделирование. – 2010. – Т. 22. – № 9. – С. 129-145.
5. Разработка нового способа разлива слябовых заготовок на МНЛЗ: моногр. / В. В. Стулов, В. А. Матысик, Т. В. Новикова, С. В. Щербаков, И. В. Чистяков, А. П. Плотников. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 158 с.
6. Kim, W. S. A Simplified Phenomenological Theory of Viscosity for Liquid Metals / W.S. Kim, T. S. Chair // Bulletin of the Korean Chemical Society. – 2001. – V. 22. – № 1. – P. 43-45.