

REFERENCES

1. Javojskij V.I. *Nemetallicheskie vključenija i svojstva stali* (Nonmetallic inclusions and properties of steel). Moscow: Metallurgija, 1980. 176 p.
2. Gubenko S.I. *Nemetallicheskie vključenija v stali* (Nonmetallic inclusions of steel). Dnepropetrovsk: ART-PRESS, 2005. 536 p.
3. Smirnov A.N. *Nepreryvnaja razlivka stali* (Continuous casting). Doneck: Cifrovaja tipografija, 2011. 482 p.
4. Rogler J. Modeling of inclusion removal in a tundish by gas bubbling: Doctor of Philosophy Electrical Engineering diss. Canada: Ryerson University, 2004. 54 p.
5. Smirnov A.N., Efimova V.G., Kravchenko A.V., Pismarev K.E. *Naukovi praci DonNTU. Serija: Metalurgija*. 2011. Issue 13 (194). pp. 80 – 92.
6. Efimova V.G., Nogovicin A.V., Kravchenko A.V. *Processy lit'ja*. 2013. № 2. pp. 60 – 67.
7. Smirnov A.N., Safonov V.M., Proskurenko D.V., Pismarev K.E. *Jelektrometallurgija*. 2009. № 7. pp. 17 – 22.
8. Reiter G., Schwerdfeger K. *ISIJ International*. 1992. Vol. 32. No. 1. pp. 50 – 56.
9. Han Z., Holappa L. *ISIJ International*. 2003. Vol. 43. No. 3. pp. 293 – 297.
10. Zhang L., Thomas B. XXIV National Steelmaking Symposium. 26-28 November. pp. 138 – 183.

Received 7 August 2013

УДК 621.746.047:669.054.2

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ПРИЕМНОЙ КАМЕРЫ ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША СЛЯБОВОЙ МНЛЗ

К.Н. Вдовин¹, д.т.н., профессор кафедры «Электрометаллургия и литейное производство»

Е.А. Мельничук¹, аспирант кафедры «Металлургия черных металлов»

А.В. Нефедов², к.п.н., заведующий кафедрой «Оборудование металлургических предприятий»

В.В. Точилкин², д.т.н., профессор кафедры «Оборудование металлургических предприятий»

¹ Магнитогорский государственный технический университет (Магнитогорск, Россия)

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Новотроицкий филиал (Новотроицк, Россия)

Аннотация. Рассмотрена компоновка элементов приемной камеры промежуточного ковша слябовой одноручевой машины непрерывного литья заготовок, оснащенной специальным металлоприемником и перегородкой, установленной на границе приемной камеры. Металлоприемник и перегородка оснащены переливными отверстиями, расположенными симметрично относительно продольной оси промежуточного ковша. Показано влияние новой компоновки системы распределения потоков стали и конструкций ее элементов на параметры потока металла в промежуточном ковше и удаление неметаллических включений.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, промежуточный ковш, металлоприемник, потоки металла, математическое моделирование.

E-MAIL: cosnovotr@rambler.ru

Промежуточный ковш (ПК) машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) обеспечивает дозирование и рафинирование стали. Совершенствование элементов ПК оказывает влияние на повышение качества разливаемой стали на МНЛЗ. На рис. 1 представлен ПК одноручевой слябовой МНЛЗ [1].

В металле, поступающем в ПК, содержатся неметаллические включения (НВ), которые с течением времени всплывают. Для удаления крупных НВ размером >20 мкм применяют металлоприемники, перегородки и пороги специальной конструкции. Указанные устройства имеют разную форму, размеры, различное место положения в ПК. При установке таких устройств объем ПК разделяется на две и более камеры – приемную и разливочные. В приемную камеру поступает металл из сталеразливочного ковша (СРК) через специальную трубу, в разливочных камерах происходит его истечение из ПК.

Анализ существующей компоновки одноручевой МНЛЗ показал [1]:

– приемная камера ПК образована глухой перегородкой, расположенной на определенной высоте над дном ковша и рядом стоящим порогом;

– путем математического моделирования установлено, что в приемной камере ПК, а также в следующей камере за перегородкой наблюдаются интенсивные вертикальные восходящие потоки, скорость которых больше допустимой (до 0,16 м/с). Это приводит к интенсивному затягиванию НВ в металл и оголению его зеркала.

Математическая модель описывает движения потоков стали [2] в ПК. При ее составлении использованы следующие уравнения: Навье-Стокса, неразрывности потока, конвективной диффузии. Геометрия модели – в зависимости от компоновки элементов конструкций систем распределения потоков стали. Масштаб модели составлял 1:1. Соответствующие уравнения имеют вид:

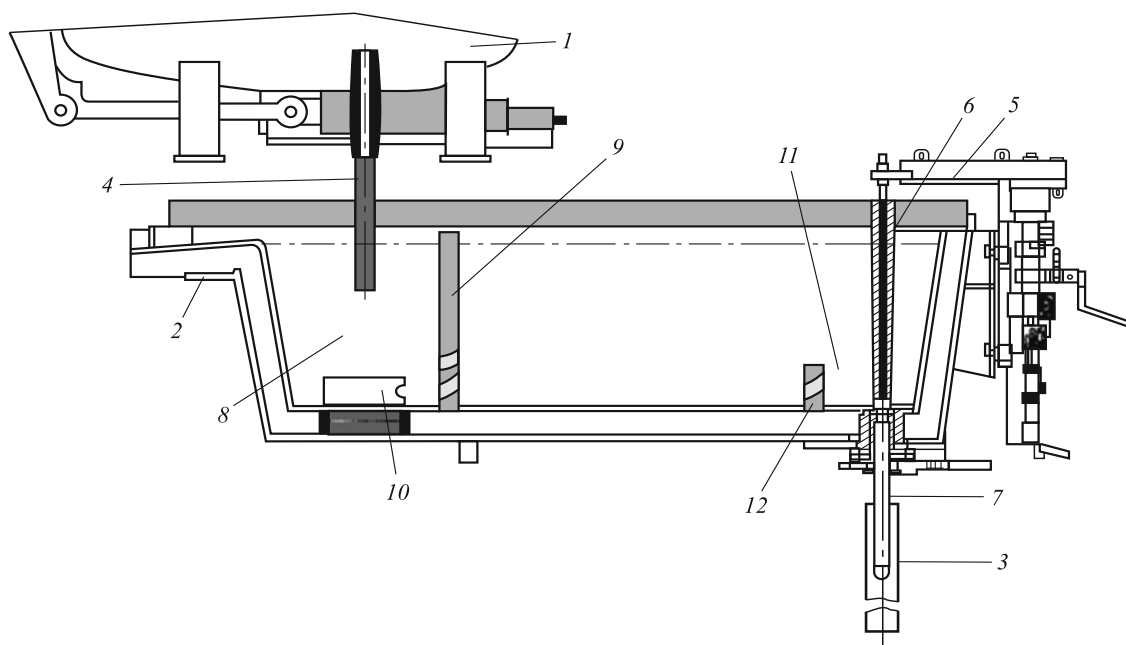


Рис. 1. Компоновка ПК одноручевой слябовой МНЛЗ:

1 – СРК; 2 – ПК; 3 – кристаллизатор; 4 – труба; 5 – механизм стопора; 6 – стопор; 7 – стакан; 8 – приемная камера ковша; 9 – перегородка приемной камеры; 10 – донный турбостоп; 11 – разливочная камера ПК; 12 – порог разливочной камеры

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{V}; \\ \nabla \vec{V} = 0; \\ \vec{u} \nabla C - D \nabla^2 C = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\vec{V}$ – вектор скорости жидкости; t – время; ∇ – оператор; $\vec{F}$ – объемные силы; p – давление жидкости; ∇p – градиент давления; ν – коэффициент кинематической вязкости; ∇^2 – лапласиан $\vec{V}$; ρ – плотность стали; $\vec{u}$ – вектор скорости движения частиц включений; C – концентрация примеси; D – коэффициент диффузии.

При расчете турбулентных течений металла в ПК используется $(k - \varepsilon)$ модель турбулентной вязкости [1]. При этом считается, что на основании гипотезы Буссинеска коэффициент вязкости, входящий в уравнения Навье-Стокса, включает в себя молекулярную вязкость μ и турбулентную вязкость μ_t [1, 3]. Коэффициент эффективной вязкости находится по зависимости

$$\mu_{\text{эф}} = \mu + \mu_t,$$

где μ – коэффициент молекулярной вязкости; μ_t – коэффициент турбулентной вязкости.

С учетом гипотезы Буссинеска уравнения Навье-Стокса принимают вид:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla (\mu_{\text{эф}} \nabla \vec{V}).$$

Турбулентная вязкость μ_t определяется решением дополнительных уравнений: уравнения распростра-

нения турбулентной энергии k и уравнения скорости ее диссипации ε [1]:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon},$$

вектор скорости включений $\vec{u}$

$$\vec{u} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 + u_0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где u_0 – скорость всплытия включений в спокойной среде; $C_\mu = 0,09$ – стандартный параметр $(k - \varepsilon)$ модели; V_1 , V_2 , V_3 – проекции скоростей течения жидкости на оси x_1 , x_2 , x_3 соответственно.

Скорость u_0 определяется по формуле Стокса [1, 2] в интервале диаметров частиц $d \in (0; 100)$ мкм. Уравнения (1), (2) дополняются начальными условиями.

При составлении математической модели приняты следующие допущения: объем ПК изначально заполнен сталью, которая является вязкой и несжимаемой; вязкость металла постоянная; скорость истечения стали из СРК в ПК постоянна и задана; расход металла из ПК равен расходу из СРК в ПК.

Созданы новая компоновка (см. рис. 1) приемной камеры на базе донного металлоприемника с разгрузочными отверстиями [3] и перегородками с переливными отверстиями на границе приемной камеры ПК [1]. Применение в ПК одноручевой МНЛЗ элементов созданной системы распределения потоков (СРП) стали обеспечивает гашение интенсивных скоростных по-

верхностных потоков в приемной камере ПК. Проведено математическое моделирование для ПК с новыми элементами СРП.

На рис. 2 представлена картина распределения потоков металла в приемной камере с донным металлоприемником, имеющим разгрузочные отверстия для создания направленных наклонных струй и блоком с переливными отверстиями. Видно, как струя металла, падающая в приемник, благодаря его форме гасится, теряет свою скорость, при этом металлоприемник защищает дно ПК от разрушения.

Создана конструкция металлоприемника с разгрузочными отверстиями (рис. 3). Не смотря на то, что их начинают широко применять в ПК МНЛЗ при разливке стали, методики расчета и конструирования не совершенны.

Определение работоспособности металлоприемника включает расчет на устойчивость, прочность, отсутствие кавитации и условие, по которому скорость на границе раздела металл–шлак в ПК должна быть меньше допустимой [1]. Стойкость к воздействию агрессивной среды определяется эрозионной стойкостью и прочностью, т.е. способностью выдерживать приложенные нагрузки без разрушения. Эрозионная стойкость элементов металлоприемника определяется расчетом устройств на кавитацию [4].

Для расчета нагрузок, действующих на металлоприемник, проанализируем процесс наполнения металлом ПК, оснащенного данным устройством. В начальный момент времени подаваемый из СРК металл открытой струей ударяет в дно приемника, при этом в полости создается давление p .

Постепенно, с наполнением ковша металлом, давление в полости металлоприемника частично

компенсируется давлением окружающего металла и при установлении рабочего периода суммарное давление будет минимальным. В качестве расчетного принято давление, создаваемое струей стали из СРК в начальный момент времени при заполнении ПК металлом.

Неизвестное давление p можно определить, предположив, что скорость металла из СРК V_+ полностью гасится встречным потоком и во внутренней полости скорость равна нулю. В этом случае давление находится как $p = \frac{\rho V_+^2}{2}$.

Зная нагрузку, действующую на металлоприемник (рис. 4), можно рассчитать неизвестные геометрические характеристики, например толщину его элементов. Если устройство не крепится к дну ПК, а свободно устанавливается в рабочее положение, необходимым условием работоспособности будет его устойчивость во время работы [3, 4].

Металлоприемник не должен всплывать и перемещаться по дну ковша в процессе цикла работы ПК. Условия равновесия имеют вид:

$$\begin{cases} P_3 + G_m > F_A \\ F_{тр} > P_1 \end{cases}, \quad (3)$$

где P_3 – сила, создаваемая струей металла; G_m – вес металлоприемника; $F_{тр}$ – сила трения между металлоприемником и дном ПК; F_A – сила Архимеда (появление силы Архимеда зависит от надежности фиксации опорной поверхности металлоприемника на дне ПК); P_1 – сила, стремящаяся сдвинуть металлоприемник.

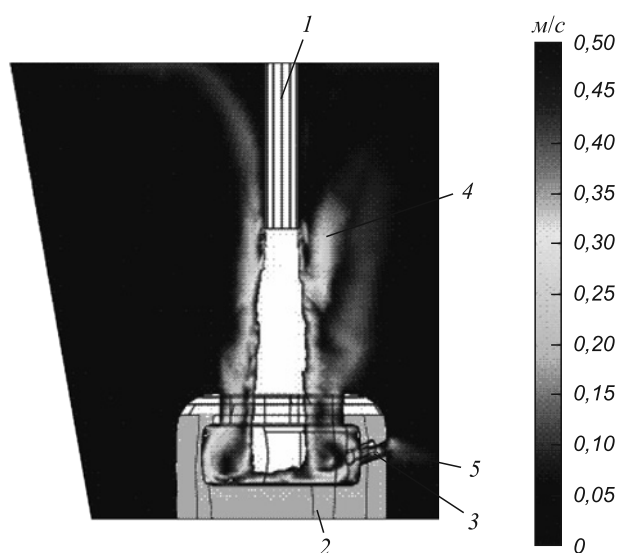


Рис. 2. Приемная камера ПК, оснащенная металлоприемником с разгрузочными отверстиями:

1 – труба СРК; 2 – металлоприемник; 3 – разгрузочные отверстия; 4 – поток металла со стороны разгрузочных отверстий; 5 – поток металла из разгрузочных отверстий

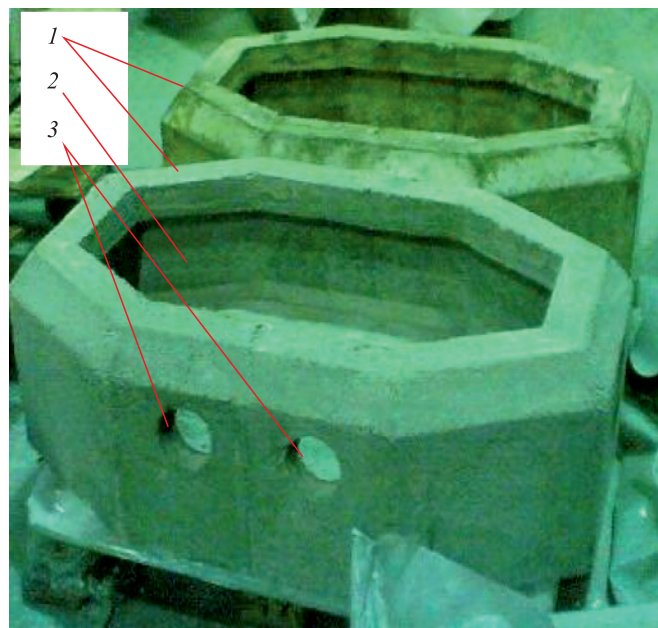


Рис. 3. Металлоприемник с пространственно ориентированными отверстиями:

1 – металлоприемники; 2 – центральное приемное отверстие; 3 – ряд переливных отверстий

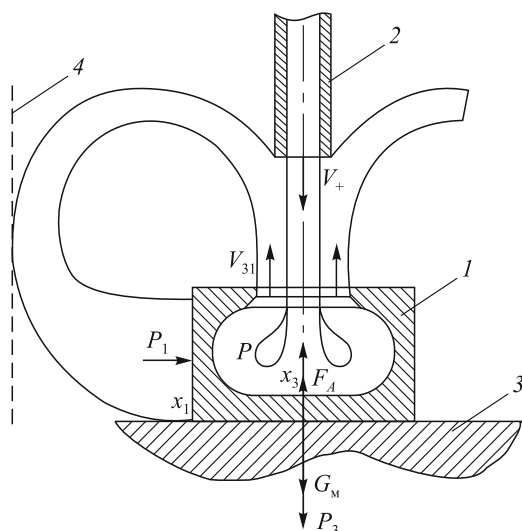


Рис. 4. Компоновка металлоприемника в ПК: 1 – металлоприемник; 2 – приемная труба; 3 – дно ПК; 4 – стенка ПК

Сила трения

$$F_{\text{тр}} = \mu_{\text{тр}} (P_3 + G_m - F_A). \quad (4)$$

Сила, сдвигающая металлоприемник, связана с неравномерностью течения металла. В процессе работы сталь течет в разливочные камеры ПК с различными расходами, что связано с неравномерным перекрытием сталеразливочных стаканов, неточной установкой металлоприемника и колебаниями жидкости. Для расчета P_1 считаем, что в некоторый момент времени возникает условие, при котором действие силы P_1 максимально. Сила возникает в результате набегания на боковую поверхность металлоприемника отраженного от препятствия потока (см. рис. 4). Таким препятствием может быть перегородка или стенка ковша.

Сила Архимеда [2, 3] находится как

$$F_A = G = \rho g \sigma_m, \quad (5)$$

где G – вектор силы тяжести жидкости в объеме погруженного в нее тела; σ_m – объем металлоприемника.

Сила P_3 может быть найдена по зависимости [2, 3]

$$P_3 = 2\rho\tau_s V_+^2,$$

где τ_s – сечение струи, поступающей из приемной трубы с внутренним диаметром d_+ .

С учетом того, что сечение струи $\tau_s = \frac{\pi d_+^2}{4}$, получим

$$P_3 = \frac{1}{2} \pi \rho (d_+ V_+)^2. \quad (6)$$

С учетом зависимостей (4) – (6) условие устойчивого положения металлоприемника (3) запишется в виде

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \pi \rho (d_+ V_+)^2 + m_m g > \rho g \sigma_m; \\ \mu_{\text{тр}} \left(\frac{1}{2} \pi \rho (d_+ V_+)^2 + m_m g - \rho g \sigma_m \right) > \frac{\rho Q_+^2}{8}, \end{cases} \quad (7)$$

где Q_+ – расход металла из сталеразливочного ковша, $\text{м}^3/\text{с}$; m_m – масса металлоприемника, кг ; $\mu_{\text{тр}}$ – коэффициент трения.

Если условия (7) выполняются, то незакрепленный металлоприемник во время работы будет сохранять свое первоначальное положение.

Разработанная методика расчета работоспособности металлоприемника ПК МНЛЗ позволяет определить размеры его элементов при модернизации ПК МНЛЗ, необходимые для выполнения заданной функции – рафинирования стали. В качестве критериев работоспособности были приняты: устойчивость, прочность, отсутствие кавитации и условие, по которому скорость на границе раздела металл–шлак должна быть меньше допустимой. Для обеспечения устойчивости и надежной фиксации металлоприемника в его конструкции необходимо предусматривать следующее.

- Элементы, обеспечивающие надежную фиксацию металлоприемника от смещений (продольного и бокового) относительно дна (бойного места) ПК.
- Элементы, обеспечивающие полное торкретирование всего контура металлоприемника при подготовке ПК. При этом должно обеспечиваться отсутствие прослойки металла между дном металлоприемника и дном ПК.
- Определенную конфигурацию наружной поверхности торкретмассы, прилегающей к металлоприемнику. Поверхность необходимо выполнять с учетом действия свободных струй металла на боковую поверхность металлоприемника.

В работе [1] проведено исследование по определению скорости потоков стали в характерных областях, где наиболее важной с точки зрения разливки металла в кристаллизаторы МНЛЗ, принята область на поверхности металла, так как на ней должно соблюдаться условие $v_n \leq [v_n]$ (v_n – скорость потока на поверхности стали; $[v_n]$ – допустимое значение скорости потока стали на поверхности), определяющее работоспособность гидродинамических устройств и элементов системы распределения потоков стали в целом. Допустимое значение скорости по рекомендации [3, 4] – $[v_n] = 0,13 \text{ м/с}$. В ПК с исходными элементами СРП стали данное условие не соблюдается, а в ПК с вновь созданными элементами СРП $v_n = 0,12 < [v_n]$.

Выводы. При дальнейшем совершенствовании и разработке процессов непрерывной разливки стали одним из вариантов конструкции более совершенного промежуточного ковша является создание новых компоновок систем распределения потоков стали и конструкций их элементов, позволяющих обеспечивать рациональное движение потоков стали со скоростями ниже мак-

симально допустимых. Это обеспечит стабильность разливки и повышение качества разливаемого металла благодаря уменьшению количества неметаллических включений, попадающих из промежуточного ковша в кристаллизатор.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вдовин К.Н., Мельничук Е.А., Точилкин В.В. // Технология металлов. 2011. № 11. С. 39 – 41.

2. Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. – М.: Металлургия, 1974. – 496 с.
3. Точилкин В.В. // Ремонт, восстановление и модернизация. 2008. № 6. С. 44 – 47.
4. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Технологии современной металлургии. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.

© 2014 г. К.Н. Вдовин, Е.А. Мельничук,
А.В. Нефедов, В.В. Точилкин
Поступила 5 февраля 2014 г.

DEVELOPMENT OF ELEMENTS RECEIVING CHAMBER OF CCM INTERMEDIATE LADLES

K.N. Vdovin¹, *Dr.Eng., Professor of the Chair of Electro-metallurgy and foundry production*

E.A. Melnichuk¹, *Postgraduate of the Chair of Ferrous Metallurgy*

A.V. Nefedov², *Dr.Eng., Head of the Chair "Equipment of metallurgical mills"*

V.V. Tochilkin², *Dr.Eng., Professor of the Chair "Equipment of metallurgical mills"*

¹ Magnitogorsk state technical university named after G.I. Nosov (Magnitogorsk, Russia)

² National University of Science and Technology "MISiS", Novotroitsk branch (Novotroitsk, Orenburg region, Russia)

E-MAIL: cosnovotr@rambler.ru

Abstract. The layout elements of the receiving chamber of the tundish one-way slab continuous casting machine (CCM), equipped with a special metal receiver and the partition, set on the border of the receiving chamber tundish are considered. The article deals with the design elements

of the flow distribution steel (PSA). Metal receiver and partition are equipped with overflow openings arranged symmetrically relative to the longitudinal axis of the PC. The Study shows the effect of the new layout and PSA steel and construction of its elements on the parameters of the metal flow in the tundish and removal of nonmetallic inclusions.

Keywords: continuous casting machine, intermediate ladle, metal reservoir, metal flows, mathematic modeling.

REFERENCES

1. Vdovin K.N., Mel'nichuk E.A., Tochilkin V.V. *Tehnologija metallov*. 2011. № 11. pp. 39 – 41.
2. Javojskij V.I., Dorofeev G.A., Povh I.L. *Teorija produvki staleplavil'noj vannы* (Blowing theory of metal). Moscow: Metallurgija, 1974. 496 p.
3. Tochilkin V.V. *Remont, vosstanovlenie i modernizacija*. 2008. № 6. pp. 44 – 47.
4. Efimov V.A., Jel'darhanov A.S. *Tehnologii sovremennoj metallurgii* (Technologies of modern metallurgy). Moscow: Novye tehnologii, 2004. 784 p.

Received 5 February 2014