

РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ РАСЧЕТА И СОЗДАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО АГРЕГАТА – ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША МНЛЗ

А.В. Нефедов, В.В. Точилкин

Рассмотрены вопросы, связанные с оценкой работоспособности перегородок и порогов промежуточных ковшей МНЛЗ. В качестве критериев работоспособности этих устройств были приняты: прочность, отсутствие кавитации, и условие по которому скорость стали на границе раздела металл–шлак должна быть меньше допустимой. Зависимости для расчета действующих на устройства сил и скоростей движения стали на границе раздела металл–шлак были получены аналитически на основании известных выражений механики жидкости и газа, и гидравлики. Разработанная методика расчета перегородок и порогов промежуточных ковшей МНЛЗ позволят рассчитать минимально возможные размеры устройства с позиции выполнения им заданной функции – рафинирования стали.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, промежуточный ковш, блок разливочной камеры, потоки металла, математическое моделирование.

Промежуточный ковш (ПК) представляет собой металлургический агрегат, расположенный между сталеразливочным ковшом и кристаллизаторами МНЛЗ, обеспечивающий дозирование и рафинирование стали. Конструкция ПК в целом и отдельных его элементов оказывает большое влияние на повышение качества разливаемого на МНЛЗ металла.

В металле, поступающем в ПК, содержатся неметаллические включения (НВ), которые с течением времени всплывают, что связано с меньшей плотностью включения по сравнению с плотностью стали. Для удаления крупных НВ размером более 20 мкм применяются перегородки и пороги специальной конструкции. Устройства имеют различные форму, размеры, местоположение в ПК [1–4]. При установке таких устройств объем ПК разделяется на две и более камеры – приемную и разливочные. В приемную камеру поступает металл из сталеразливочного ковша, в разливочных камерах происходит его истечение из ПК [2, 3].

Несмотря на то, что описанные устройства давно применяются при разливке стали, обоснованные методики оценки их расчета и конструирования развиты недостаточно. В работах [3, 4] указываются некоторые соображения по поводу оценки работоспособности таких устройств. Прежде всего, перелив стали через отверстия в перегородках не должен сопровождаться кавитационными процессами, это условие требует расчета устройства на кавитацию. Остальные условия явно не выражены, а представлены в виде нескольких рекомендаций, касающихся размеров отверстий, их расположения, совокупной площади сечения и т. д.

В материале приводятся основные критерии работоспособности перегородок и порогов ПК МНЛЗ, а также основные расчетные зависимости, полученные аналитическим путем, на основе известных выражений механики жидкости и газа [1, 2].

Расчет работоспособности перегородок и по-

рогов включает расчет устройств на стойкость и по условию движения стали на границе раздела металл–шлак.

Стойкость устройства к воздействию агрессивной среды определяется эрозионной стойкостью и прочностью, т. е. способностью выдерживать приложенные нагрузки без разрушения. Эрозионная стойкость определяется расчетом устройств на кавитацию [1]. Это предположение справедливо, поскольку эрозионное разрушение вследствие химических реакций между огнеупорным материалом и расплавом наблюдается на уровне шлакового пояса [2]. Нагрузки на перегородку в районе шлакового пояса минимальны и разрушение ее верхней части не приводит к серьезным нарушениям работы ПК. Что касается порогов, то они вообще не взаимодействуют со шлаком.

Расчет устройств на кавитацию в статье не рассматривается, поскольку он подробно изложен в работе [1]. При расчетах перегородок и порогов на прочность делается допущение, что в начальный момент разливки, при заполнении ПК, сталь в приемной камере устанавливается на уровне устройства, а в разливочных камерах металл отсутствует (рис. 1). При таком упрощении неизбежны ошибки, однако они направлены в сторону увеличения запаса прочности устройства.

Действующее на устройство гидростатическое давление определяется по зависимости

$$p_{\text{ср}} = \frac{1}{2} \rho g h_{\text{ст}},$$

где ρ – плотность стали, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; $h_{\text{ст}}$ – высота уровня стали в приемной камере ковша, м.

По известным нагрузкам можно рассчитать минимальную толщину гидродинамического устройства.

Что касается проверки работоспособности по условию движения стали на границе раздела ме-

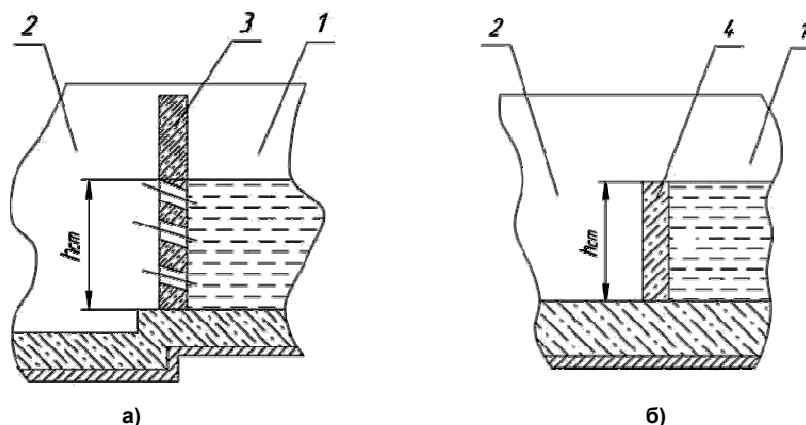


Рис. 1. Схема положения уровня металла в промежуточном ковше в момент его заполнения при установке перегородки (а) и при установке порога (б): 1 – приемная камера; 2 – разливочная камера; 3 – перегородка; 4 – порог

талл–шлак, то она необходима, поскольку конструктивные особенности применяемых устройств способствуют образованию более интенсивных течений на границе раздела металл–шлак. Условие работоспособности звучит следующим образом: скорость стали на границе раздела металл–шлак не должна превышать допустимой скорости, т. е.

$$u_n \leq [u_n],$$

где u_n – скорость стали на границе раздела металл–шлак, м/с; $[u_n]$ – допустимая скорость на границе раздела металл–шлак, м/с.

По данным работы [2], в 1992 г. японскими исследователями проводились работы по изучению причин затягивания покровного шлака в кристаллизаторе. Было показано, что затягивание шлакообразующей смеси происходит при скорости движения стали у поверхности, превышающей 0,2 м/с. Однако волнообразование на поверхности расплава в промежуточном ковше происходит гораздо интенсивнее, поэтому значение допустимой скорости было уменьшено в 1,5 раза и составило $[u_n] = 0,13$ м/с.

Скорость на границе раздела металл–шлак при установке перегородки была получена аналитически на основании известных зависимостей механики жидкости и газа, описывающих струйные течения [1, 2]. Затопленные струи на некотором удалении от перегородки сливаются в сплошной поток (рис. 2, а). Определить скорости металла в этом потоке можно, применив к струйным течениям принцип суперпозиции, т. е.

$$\vec{u} = \sum_{i=1}^m \vec{u}_i, \quad (1)$$

где \vec{u} – суммарный вектор скорости стали, м/с; \vec{u}_i – вектор скорости металла в затопленной струе, создаваемой i -м отверстием, м/с.

Движением стали в радиальном направлении затопленной струи решено пренебречь, поскольку ее скорость в этом направлении значительно мень-

ше скорости движения в осевом направлении струи и не оказывает существенного влияния на расчет. Это заключение сделано на основе анализа зависимостей, определяющих распространение турбулентных струй, представленных в работах [2].

Поскольку поток из отверстий в перегородке ориентирован под некоторым углом α к зеркалу металла и расчетная формула (1) определяет осевую скорость струи u_{1S} в системе координат $x_{1S}x_{2S}x_{3S}$, повернутой также под углом α к принятой за основную системе координат $x_1x_2x_3$, необходимо осуществить преобразование [1, 2]

$$\begin{bmatrix} x_{1S} \\ x_{2S} \\ x_{3S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} x_{1S} \\ x_{2S} \\ x_{3S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \cos \alpha + x_3 \sin \alpha \\ x_2 \\ -x_1 \sin \alpha + x_3 \cos \alpha \end{bmatrix}.$$

Скорость в осевом направлении струи определяется по зависимости [1, 2]

$$u_{1S} = \sum_{i=1}^m \frac{u_{\max i}}{\left(1 + u_{\max i} \frac{x_{3Si}^2}{8v_{ei} x_{1Si}}\right)^2},$$

где $u_{\max i}$ – осевая скорость стали затопленной струи, истекающей из i -го отверстия перегородки, м/с; v_{ei} – вихревая вязкость затопленной струи, истекающей из i -го отверстия перегородки, м²/с.

С учетом преобразования координат скорость u_{1S} равна

$$u_{1S} = \sum_{i=1}^m \frac{u_{\max i}}{\left(1 + u_{\max i} \frac{x_{3Si}^2}{8v_{ei} x_{1Si}}\right)^2}.$$

Скорость на границе раздела находится при условии $x_{3i} = h_{6i}$ и равна

$$u_{пн} = \max \left[\sum_{i=1}^m \frac{u_{\max i}}{\left(1 + u_{\max i} \frac{(h_{\delta i} \cos \alpha - l \sin \alpha)^2}{8v_{ei}(l \cos \alpha + h_{\delta i} \sin \alpha)}\right)^2} \right] \leq [u_{пн}].$$

Максимальное значение скорости определяется в интервале

$$x_1 \in \left(\min \left(\frac{h_{\delta i}}{\operatorname{tg}(\alpha + 0,5\alpha_p)} \right); l \right),$$

где α_p – угол раскрытия турбулентной струи, град.

Он равен 22–26° [1, 2]; l – длина пути затопленной струи, м (см. рис. 2, а).

Вихревая вязкость v_{ei} и скорость на оси затопленной струи рассчитываются по формулам:

$$v_{ei} = 0,013u_{0i}d_{0i};$$

$$\frac{u_{\max i}}{u_{0i}} = \frac{6,4d_{0i}}{x_1 \cos \alpha + h_{\delta i} \sin \alpha},$$

где u_{0i} – начальная скорость струи, истекающей из i -го отверстия перегородки, м/с; d_{0i} – диаметр i -го отверстия перегородки, м.

Скорость стали на границе раздела металл–шлак при установке порога была получена аналитически на основании зависимостей, описывающих течения жидкости в руслах со свободной поверхностью [1, 2]. Для расчета скорости металла на границе раздела металл–шлак (рис. 2, б) делаются следующие допущения:

1. Считается, что градиент скорости $\partial u_1 / \partial x_2 = 0$, это говорит о том, что сечение либо бесконечно, либо происходит проскальзывание вдоль стенок ковша. Принятое допущение учитывается поправочным коэффициентом k_u .

2. проекции u_2 и u_3 равны нулю.

В соответствии с работой [1, 2] скорость по сечению потока при течении в канале определяется зависимостью

$$u_1 = \frac{\Delta p}{2\nu\rho l_{пн}} x_3(2H - 2h - x_3), \tag{2}$$

где H – высота столба металла в промежуточном ковше, м; h – высота порога, м; $l_{пн}$ – ширина порога, м; Δp – перепад давления, Па.

Перепад давления равен

$$\Delta p = \lambda \frac{l_{пн}}{(H-h)} \frac{\rho u_{1cp}^2}{2},$$

где u_{1cp} – средняя скорость течения металла через проточное сечение, м/с; λ – коэффициент сопротивления.

Коэффициент сопротивления λ принимается аналогичным коэффициенту сопротивления плоской трубы

$$\lambda = \frac{24}{\operatorname{Re}}.$$

Число Рейнольдса равно

$$\operatorname{Re} = \frac{u_{1cp}(H-h)}{\nu}.$$

Зависимость (2) с учетом полученных выражений записывается в виде

$$u_1 = 6k_u \frac{u_{1cp}}{(H-h)^2} x_3(2H - 2h - x_3),$$

где k_u – коэффициент, учитывающий изменение скорости по ширине проточного сечения порога.

На границе раздела, $x_3 = H - h$, скорость течения максимальна и определяется зависимостью

$$u_{пн1} = 6k_u u_{1cp}.$$

Благодаря действию стенок ковша на поток, скорость металла по центру проточного сечения будет несколько выше, чем рассчитанная ранее для бесконечного потока. Незвестный коэффициент k_u можно определить как

$$k_u = \max \left(\frac{u'_1}{u_1} \right), \tag{3}$$

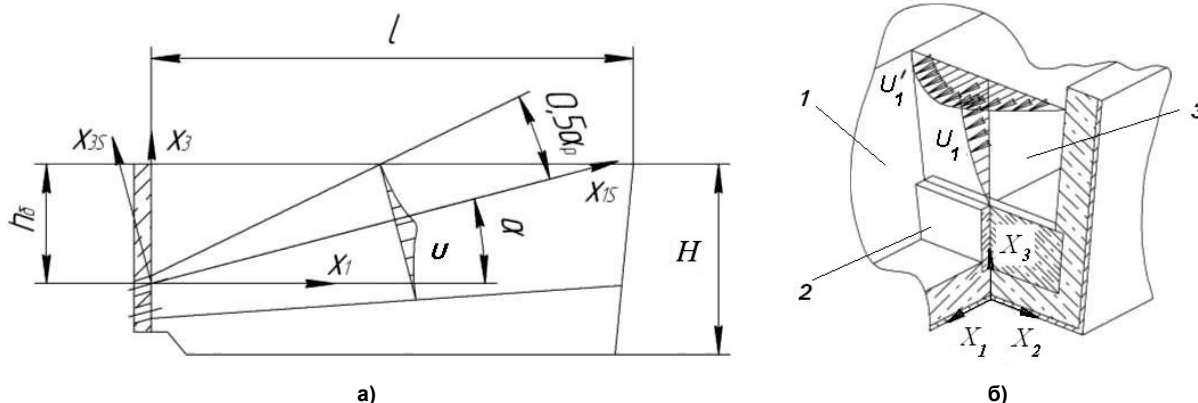


Рис. 2. Схема расчета скорости металла на границе раздела металл–шлак при установке перегородки (а) и при установке порога (б): 1 – ПК; 2 – порог; 3 – проточное сечение

где u'_1 – максимальная скорость потока между двумя стенками ковша (см. рис. 2, б), м/с.

Скорость u'_1 может быть определена по известной зависимости [3]

$$u'_1 = \frac{3}{2} u_1. \quad (4)$$

С учетом зависимостей (3), (4) коэффициент равен $k_u = 1,5$.

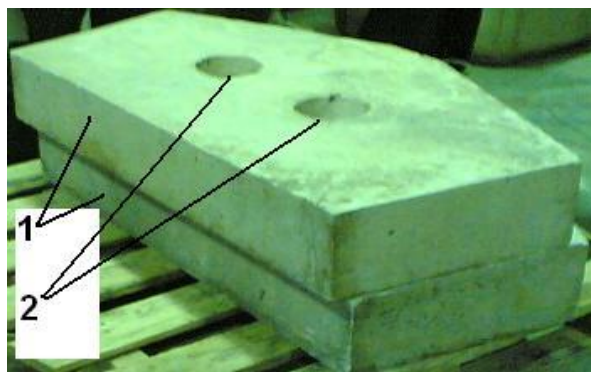


Рис. 3. Новый огнеупорный элемент СРП – блок разливочной камеры (порог) с двумя пространственно ориентированными отверстиями: 1 – порог; 2 – ряд переливных отверстий блока

На основании разработанных методов расчета создана конструкция (рис. 3) нового огнеупорного элемента – блока разливочной камеры (порога) с двумя пространственно ориентированными отверстиями для одноручьевого ПК слябовой МНЛЗ.

Вывод

Разработанная методика расчета работоспособности перегородок и порогов промежуточных ковшей МНЛЗ позволяет определить основные размеры элементов промежуточного ковша с позиции выполнения им заданной функции – рафинирования стали – и создать конструкцию нового огнеупорного элемента – блок разливочной камеры (порог) с двумя пространственно ориентированными отверстиями для одноручьевого промежуточного ковша слябовой МНЛЗ. В качестве критериев работоспособности были приняты: прочность, отсутствие кавитации и условие, по которому скорость на границе раздела металл – шлак должна быть меньше допустимой.

Литература

1. Ефимов, В.А. Технологии современной металлургии / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
2. Вдовин, К.Н. Рафинирование стали в промежуточном ковше МНЛЗ: моног. / К.Н. Вдовин, М.В. Семенов, В.В. Точилкин. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2006. – 118 с.
3. Семенов, М.В. Разработка рафинирующих устройств модернизируемых промежуточных ковшей МНЛЗ / М.В. Семенов, В.В. Точилкин // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2007. – № 3. – С. 15–19.
4. Точилкин, В.В. Модернизация промежуточного ковша МНЛЗ для обеспечения повышения качества разливаемой стали / В.В. Точилкин // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2007. – № 2. – С. 5–7.

Нефедов Андрей Викторович, канд. пед. наук, зав. кафедрой оборудования металлургических предприятий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», филиал в г. Новотроицк (г. Новотроицк); cosnovotr@rambler.ru.

Точилкин Виктор Васильевич, д-р техн. наук, профессор кафедры оборудования металлургических предприятий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», филиал в г. Новотроицк (г. Новотроицк); cosnovotr@rambler.ru.

Поступила в редакцию 27 мая 2014 г.

DEVELOPMENT OF CALCULATION METHODOLOGY AND CREATION OF ELEMENTS OF METALLURGICAL UNITS – INTERMEDIATE CCM LADLES

A.V. Nefedov, National Research Technological University "MISiS", Novotroitsk Branch, Novotroitsk, Russian Federation, cosnovotr@rambler.ru,

V.V. Tochilkin, National Research Technological University "MISiS", Novotroitsk Branch, Novotroitsk, Russian Federation, cosnovotr@rambler.ru

The article considers questions connected with the estimation of serviceability of partitions and thresholds of intermediate CCM ladles. Some criteria of the device serviceability were accepted, such as durability, absence of cavitations and condition at which steel speed on the metal-slag border should be less than the proposed one. Dependences to calculate forces affecting the device as well as steel movement speeds on the metal-slag border were received analytically on the basis of famous expressions of mechanics of liquid, gas and hydraulics. The technique developed to calculate partitions and thresholds of intermediate CCM ladles will allow to calculate the minimum possible device sizes on account of the proposed function of steel refinement.

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

References

1. Efimov V.A., El'darkhanov A.S. *Tekhnologii sovremennoy metallurgii* [Technologies of Modern Metallurgy]. Moscow, Novye Tekhnologii Publ., 2004. 784 p.
2. Vdovin K.N., Semenov M.V., Tochilkin V.V. *Rafinirovanie stali v promezhutochnom kovshe MNLZ* [Steel Refining in CCM Tundish]. Magnitogorsk, MGTU Publ., 2006. 118 s.
3. Semenov M.V., Tochilkin V.V. [Development of Refining Devices for Upgraded CCM Tundish]. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya*, 2007, no. 3, pp. 15–19. (in Russ.)
4. Tochilkin V.V. [Modernization of CCM Tundish for Improving the Quality of Cast Steel]. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya*, 2007, no. 2, pp. 5–7. (in Russ.)

Received 27 May 2014