

УДК 621.746.047:669.054.2

**РАЗВИТИЕ КОНСТРУКЦИЙ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА  
ОБОРУДОВАНИЯ РАЗЛИВОЧНЫХ КАМЕР ПРОМЕЖУТОЧНЫХ  
КОВШЕЙ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК****Точилкин Вик.В., Филатова О.А., Точилкин Вас.В., Камалихина З.В.***ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
Магнитогорск, e-mail: toch56@mail.ru*

В работе рассматриваются конструкции оборудования разливочных камер промежуточного ковша (ПК) машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Оборудование функционирует в системе: промежуточный ковш – кристаллизатор МНЛЗ. Созданы конструкции оборудования разливочных камер ПК, обеспечивающие эффективное использование затопленных струй стали, направляющихся через разливочное отверстие в кристаллизатор. Цель работы – развитие конструкций и методов расчета конструкций оборудования разливочных камер ПК с целью снижения нагрузки, действующей на стопор разливочного отверстия, создание условий для рационального направления движения потоков стали в разливочное отверстие в кристаллизаторе. Впервые представлена расчетная схема совместно работающих в разливочной камере оборудования порога с пространственно-ориентированными отверстиями и стопора разливочного отверстия. В работе представлены основные принципы построения конструкций разливочных камер промежуточных ковшей, разработанных с учетом обеспечения совместной работы всего комплекта оборудования камер ПК и специфики кристаллизатора. Представленные в работе конструкции и методы расчета оборудования разливочных камер позволяют обеспечить рациональный выбор оборудования промежуточного ковша и оборудования для направления жидкого металла в кристаллизатор для всего парка сортовых и слябовых МНЛЗ, имеющих различное число ручьев.

**Ключевые слова:** машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), промежуточный ковш (ПК), кристаллизатор (К), математическое моделирование, огнеупорные конструкции

**DEVELOPMENT OF DESIGNS AND METHODS FOR CALCULATING  
THE EQUIPMENT OF FILLING CHAMBERS OF TUNDISH  
OF CONTINUOUS CASTING MACHINES****Tochilkin Vik.V., Filatova O.A., Tochilkin Vas.V., Kamalikhina Z.V.***Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, e-mail: toch56i@mail.ru*

The work considers the design of the equipment of the filling chambers of the tundish (TS) of the continuous casting machine (CCM). The equipment operates in the system: tundish – mold of CCM. TS filling chamber equipment designs have been created to ensure the efficient use of flooded steel jets guided through the filling hole to the mold. Development of structures and methods of structural analysis of pc filling chamber equipment in order to reduce the load acting on the stop of the spill hole, to create conditions for the rational direction of movement of steel sweats into the filling hole in the mold. For the first time, the design scheme of the threshold equipment with spatially oriented holes and the stopper of the filling hole working together in the filling chamber is presented. Result: the paper presents the basic principles of building structures for filling chambers of intermediate buckets, developed taking into account the joint operation of the entire set of PC camera equipment and the specifics of the mold. The designs and methods of calculating the equipment of filling chambers presented in the work make it possible to ensure a rational choice of tundish and equipment for directing liquid metal to the mold for the entire fleet of varietal and slab CCM with a different number of streams.

**Keywords:** continuous casting machine (CCM), tundish (TS), mold (M), mathematical modeling, refractory structures

Определяющую роль в прохождении стали в кристаллизаторе выполняет оборудование разливочного отверстия промежуточного ковша машины непрерывного литья заготовок [1]. Наиболее ответственные стали разливаются закрытой струей, в этом случае в конструкции оборудования разливочного отверстия применяется стопорный механизм, оснащенный рабочим инструментом – стопором [2]. Стопор выполняет важнейшую функцию при подаче стали в кристаллизатор – обеспечивает регулирование расхода стали через разливочное отверстие. От рациональной работы стопора, его эффективной работы во многом определяется формирование заготовки в верхней части кристаллизатора [3].

Цель исследования – развитие конструкций и методов расчета конструкций оборудования разливочных камер промежуточных ковшей с целью снижения нагрузки, действующей на стопор разливочного отверстия, создание условий для рационального направления движения потоков стали в разливочное отверстие и далее в кристаллизатор.

**Материалы и методы исследования**

Рабочий элемент стопорного механизма разливочного отверстия – стопор перемещается относительно продольной оси разливочного отверстия в результате применения гидравлического или электромеханического привода [4]. Работа стопора

определяется во многом поведением потоков жидкого металла в разливочных камерах ПК. Промежуточные ковши имеют различные конструкции разливочных камер. Самые сложные компоновки разливочных камер выполняются около центральных и крайних ручьев. В центральных разливочных камерах необходимо, кроме разливки стали в кристаллизатор, обеспечивать рациональные схемы приема металла из сталеразливочного ковша. В крайних камерах при конструировании оборудования должна учитываться специфика ограничения потока металла вдоль ковша торцевыми стенками и влияние движения металла в соседних разливочных камерах ПК [5].

Для оценки поведения узлов агрегатов МНЛЗ в период разливки жидкого металла выполняется моделирование движения потоков металла, при этом оцениваются случаи при наличии и без устройств управления процессами, таких как металлоприемник приемной камеры; перегородки; пороги [6]. Для оценки поведения оборудования разливочного отверстия рассматривается оборудование крайней разливочной камеры (рис. 1). Задача состоит в том, чтобы при заданной конфигурации и определенной оснащенности оборудованием промежуточного ковша рассчитать следующие параметры: распределение скорости потоков стали; пространственное расположение линий тока, нагрузки и давления действующие на стопор. Математически это обозначает необходимость записать уравнение неразрывности потока металла; уравнения движения в сочетании с моделью турбулентности. Все это необходимо записать в пространственных координатах [7].

Для полной постановки задачи необходимо задать скорости потока у входного отверстия – выход защитной трубы сталеразливочного ковша и давление у выходного отверстия – погружной стакан кристаллизатора (оно принимается равным атмосферному). Задаются граничные условия, определяющие градиенты скоростей на свободных поверхностях и в плоскостях симметрии.

Важную роль при этом играют начальные условия: температура разливаемого металла, уровень стали в промежуточном и сталеразливочном ковшах при номинальном уровне. На рис. 2 представлен результат проведенного расчета – поля давлений на поверхности порога разливочной камеры ПК. Для расчета воздействия потоков металла на стопор разливочного отверстия разработана методика, дающая возможность выполнить расчет

усилий в самом стопоре и месте его крепления на механизме [8].

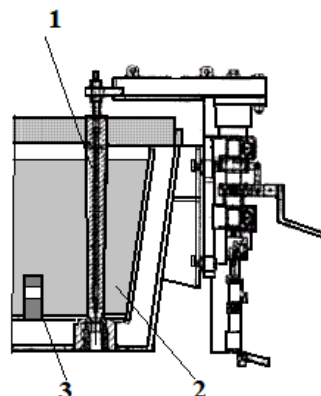


Рис. 1. Расположение оборудования в крайней разливочной камере промежуточного ковша:  
1- стопорный механизм разливочного отверстия; 2 – крайняя разливочная камера; 3 – порог на границе разливочной камеры

По результатам расчета определена картина распределений давлений, действующих на конструкцию порога (рис. 2). Наибольшие значения давлений представлены в нижней части порога. Данное распределение давлений требует рассмотреть параметры давления и усилий, действующих непосредственно на стопор. Стопор в зависимости от комплектации оборудования разливочной камеры может работать без оборудования в разливочной камере или совместно с установленным перед стопором порогом [9].

Проведена оценка потоков движения металла. Во многих ПК МНЛЗ при разливке пороги и другие аналогичные элементы, например перегородки, не используются. В этом случае возникает наиболее неблагоприятная схема нагружения со стороны давления потоков жидкого металла – наибольшее давление на стопор действует в нижней части стопора. При этом необходимо отметить, что стопор закреплен относительно стопорного механизма консольно, в верхней части. При такой схеме закрепления стопор испытывает наибольшие нагрузки.

Воздействие на стопор определяем по выражению [9]:

$$W = \frac{1}{2} c_{\omega} \rho V_{\infty}^2 S, \quad (1)$$

где  $c_{\omega}$  – коэффициент сопротивления единицы длины поверхности стопора;  $S$  – площадь поперечного сечения (миделя) рабочего инструмента – стопора;  $\rho$  – плотность стали, находящейся в жидком состоянии.

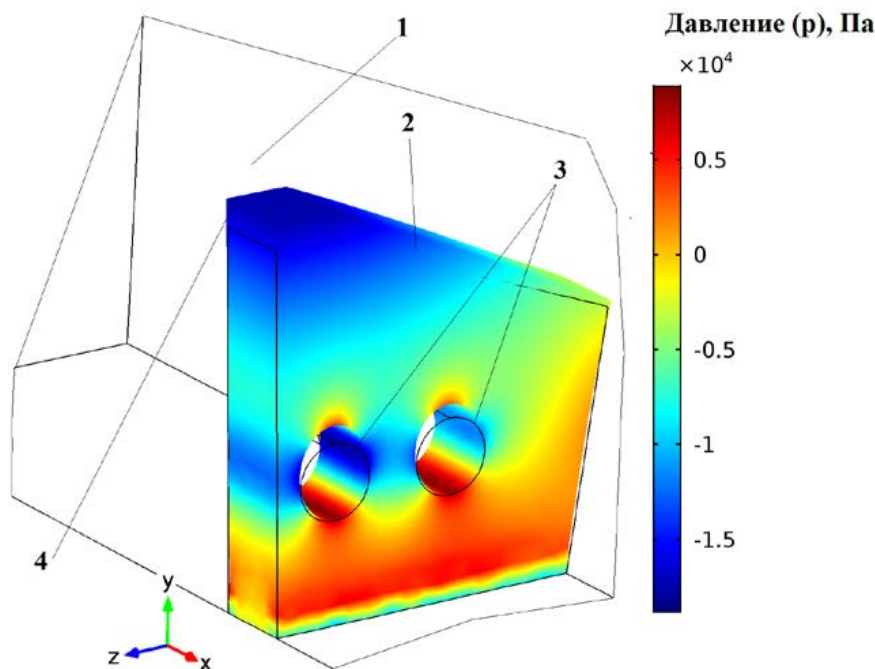


Рис. 2. Расчетное поле давлений на поверхности порога крайней разливочной камеры:  
 1 – крайняя разливочная камера ПК; 2 – порог разливочной камеры;  
 3 – отверстия для направления затопленных струй металла вне рабочей поверхности стопора;  
 4 – выступ в центральной части порога

При оценке скоростей необходимо рассмотреть две схемы воздействия потоков металла на стопор и определить среднюю скорость движения металла:

- при отсутствии дополнительного оборудования перед стопором: порогов, выступов, перегородок и т.п. При этом возникает максимальное воздействие потоков металла на поверхность стопора, что создает условия для создания существенных воздействий на рабочий элемент стопорного механизма и узел его крепления к оборудованию ковша.
- при наличии дополнительного оборудования, снижающего динамическое воздействие на стопор разливочного отверстия – применение порога на границе разливочной камеры (рис. 1).

Параметры скоростей оцениваем по зависимости [9]

$$u = \frac{3}{8\pi\sigma} \sqrt{\frac{J}{\rho}} \frac{1}{l} \frac{1}{\left[1 + \frac{3}{64\pi\sigma^2} \left(\frac{r}{l}\right)^2\right]^2}, \quad (2)$$

где  $J$  – импульс струи, кг/с;  $\rho$  – плотность жидкого металла ( $\rho = 700$  кг/м<sup>3</sup>);  $l$  – расстояние от порога до расчетного сечения расположения стопора в ковше, м;  $r$  – радиус вектор, м;  $\sigma$  – коэффициент,

характеризующий турбулентную структуру струи,  $\sigma = 0,21$ .

Импульс определяется по зависимости

$$J = 3,14 \cdot d^2 u_0^2 \frac{\rho}{4}, \quad (3)$$

где  $d$  – диаметр отверстий, м;  $u_0$  – скорость истечения струи, м/с.

Зная поле скоростей, необходимо оценить среднюю скорость потока, действующего на стопор. При этом считаем, что поток действует по всему уровню стали в ковше. Тогда

$$u_{cp} = Q / S, \quad (4)$$

где  $Q$  – расход металла по миделеву сечению стопора, м<sup>3</sup>/с;  $S$  – площадь миделева сечения, м<sup>2</sup>.

$$S = d_c \cdot h_m, \quad (5)$$

где  $d_c$  – обтекаемый размер стопора, м;  $h_m$  – уровень металла в ковше, м.

Тогда поток стали в миделевом сечении можно определить по зависимости

$$Q = \int_{-\frac{h_m}{2}}^{\frac{h_m}{2}} \int_{-\frac{d_m}{2}}^{\frac{d_m}{2}} (u) dy dx. \quad (6)$$

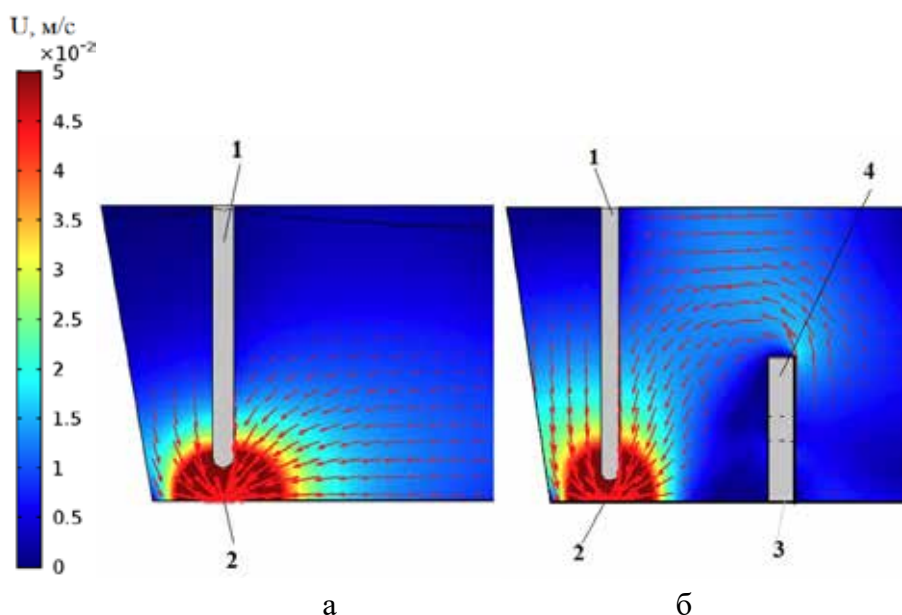


Рис. 3. Расположение потоков жидкого металла в ПК со стопором:  
 а – разливочная камера без дополнительного оборудования;  
 б – в разливочной камере установлен порог с переливными отверстиями:  
 1 – стопор; 2 – разливочное отверстие; 3 – порог; 4 – выступ в центральной части порога

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты математического моделирования позволили выявить характер течения жидкого металла в разливочной камере, не оснащенной (рис. 3, а), а также оснащенной порогом (рис. 3, б), установленным на границе разливочной камеры. Видно, что:

1) на стопор, в случае отсутствия порога (рис. 3, а), действуют интенсивные скоростные потоки по всему миделю стопора, при этом в нижней части ковша величины скоростей резко увеличиваются. Это приводит к значительным нагрузкам на стопор в нижней его части и узел крепления стопора, расположенный в верхней части ПК;

2) в разливочной камере, оснащенной дополнительным оборудованием – порогом 3 (рис. 3, б), картина распределения потоков иная. По итогам проведенного математического моделирования определен характер движения потока стали в районе порога 3 и его выступа 4. Потоки металла обтекают сам порог 3 и его центральный выступ 4. Векторы скоростей потоков стали в результате переориентированы со дна в среднюю часть объема ковша. При этом потоки металла воздействуют на стопор по миделю в верхней части стопора;

3) зная значения скоростей, воспользовавшись формулой (1), можно определить

значение силы давления на стопор, считая  $c_\omega = 2$  [9], при  $Re = 75000$  для схемы без порога в разливочной камере, и  $c_\omega = 2$  [9], при  $Re = 56900$  для схемы с порогом в разливочной камере.

Давление на стопор без порога (рис. 3, а) –  $W = 2,8$  (Н);

давление на стопор при установке порога (рис. 3, б) –  $W = 0,4$  (Н).

Как видно, в случае установки порога с центральным выступом и переливными отверстиями (рис. 2) давление и нагрузки на стопор уменьшаются в семь раз.

### Выводы

1. Благодаря методам математического моделирования выполнен анализ особенностей работы конструкций разливочных камер ПК, оснащенных стопорными механизмами, обеспечивающими перемещение жидкого металла в ковше и последующую подачу стали в кристаллизаторы МНЛЗ. Рассмотрена методология определения параметров течения жидкой стали в объеме ковша и параметров воздействия на стопор [10]. Стопор, являясь рабочим инструментом стопорного механизма – манипулятора для регулирования скорости движения стали в кристаллизатор, выполняет важнейшие функции в процессе разливки.

2. Для снижения нагрузки на стопор предложена компоновка разливочной камеры ПК

с порогом на её границе. В порог выполняются специальные переливные отверстия, обеспечивающие перемещение затопленных струй мимо конструкции стопора.

3. На основе проведенного моделирования и анализа движения потоков стали на порог выполняется специальный выступ в центральной части. Его использование снижает динамическое воздействие потоков на поверхность стопора.

4. Нагрузки на стопор при использовании дополнительного оборудования уменьшаются. Предпочтительно использовать ПК с дополнительным оборудованием в виде порогов на границе разливочных камер.

### Список литературы

1. Guschin V.N., Ulyanov V.A. Improved tundish refining of steel in continuous-casting machines. *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. No. 5. P. 320–324.
2. Еронько С.П., Стародубцев Б.И., Понамарева Е.А., Цысмистро Е.С. Разработка новой конструкции и модельные исследования функционирования катапульты для ковшевого затвора // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2021. № 5. С. 540–546.
3. Sotnikov A.L., Sholomitskiy A.A. Monitoring alignment of mold oscillatory motion with CCM process stream axis. *Metallurgist*. 2017. Vol. 60. No. 9/10. P. 1046–1053.
4. Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Добрынин С.М., Мельничук Е.А., Точилкин В.В. Конструкции и расчет металлоприемника промежуточного ковша симметричной многоручьевой МНЛЗ // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2019. Т. 17. № 3. С. 25–30.
5. Протопопов Е.В., Числавлев В.В., Темлянец В.В., Головатенко А.В. Повышение эффективности рафинирования рельсовой стали в промежуточных ковшах МНЛЗ на основе рациональной организации гидродинамических процессов // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2020. Т. 63. № 5. С. 298–304.
6. Еронько С.П., Понамарева Е.А., Цысмистро Е.С. Разработка вибрационной системы снижения интенсивности процесса затягивания выпускного канала сталеразливочного ковша // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2021. № 2. С. 165–174.
7. Solorio-Diaz G., Morales R.D., Barreto J. de J., Vergara-Hernandez H.J., Ramos-Banderas A., Galvan S.R. Numerical Modelling of Dissipation Phenomena inside a New Ladle Shroud for Fluidynamic Control and its Effect on Inclusion Removal in a Slab Tundish // *Steel Research International*. 2014. Vol. 85. No. 5. P. 863–874.
8. Vdovin K.N., Tochilkin V.V., Yachikov I.M. Designing refractories for the tundish of a continuous caster. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2016. Т. 56. No. 6. P. 569–573.
9. Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Филатова О.А. Совершенствование конструкций огнеупоров разливочной камеры промежуточного ковша сортовой МНЛЗ // *Новые огнеупоры*. 2015. № 9. С. 3–7.
10. Сотников А.Л., Стриченко С.М., Киреев В.М., Фоменко Ю.В. Состояние и перспективы совершенствования оборудования сортовых МНЛЗ // *Сталь*. 2020. № 10. С. 7–16.