

Д. т. н. **К. Н. Вдовин**, **Василий В. Точилкин**, к. т. н. **О. А. Филатова**,
 д. т. н. **Виктор В. Точилкин** (✉)

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический
 университет им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

УДК 621.746.047:669.054.2

КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОГНЕУПОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША СОРТОВОЙ МНЛЗ

Рассмотрены конструкции огнеупорного оборудования камер промежуточных ковшей сортовых машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Совершенствование оборудования обеспечивает эффективное формирование потоков металла и создает условия для повышения его качества. Проведена оценка работоспособности перегородок и порогов промежуточных ковшей МНЛЗ: прочность, отсутствие кавитации и условие, по которому скорость стали на границе раздела металл – шлак должна быть меньше допустимой.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), промежуточный ковш (ПК), потоки металла, моделирование.

КОНСТРУКЦИИ КОВША И ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В металле, поступающем в промежуточный ковш (ПК) содержатся неметаллические включения (НВ), которые с течением времени всплывают, так как имеют меньшую плотность [1]. Для удаления крупных НВ размером более 20 мкм применяют перегородки и пороги специальной конструкции. Устройства имеют различные форму, размеры и местоположение в ПК [2]. При установке таких устройств объем ПК разделяется на две и более камер: приемную, разливочные и реакционные. В приемную камеру поступает металл из сталеразливочного ковша через специальную трубу, в разливочных камерах происходит его истечение из ПК [3] (рис. 1). Анализ существующей компоновки четырехручьевой МНЛЗ [4] показал, что приемная камера ПК образована металлоприемником без разгрузочных отверстий и рядом стоящими порогами, разливочные камеры формируются порогами.

Путем математического моделирования установлено, что в приемной камере ПК и следующих разливочных камерах за порогами наблюдаются интенсивные вертикальные восходящие потоки и их скорость выше допустимой (до 0,16 м/с) [2]. Это приводит к интенсивному затягиванию НВ в металл и оголению его зеркала.

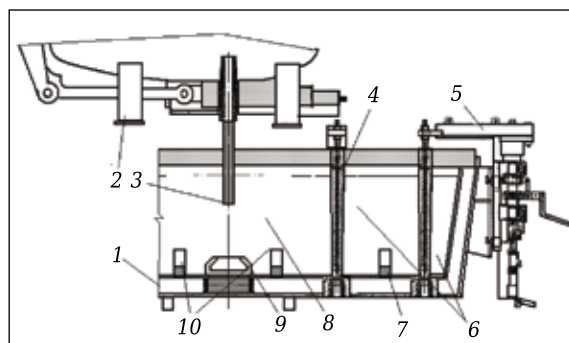


Рис. 1. Компоновка ПК четырехручьевой МНЛЗ до модернизации: 1 — ПК; 2 — сталеразливочный ковш; 3 — труба; 4 — стопор; 5 — механизм стопора; 6 — разливочные камеры ПК; 7 — порог разливочной камеры; 8 — приемная камера ковша; 9 — донный металлоприемник; 10 — пороги приемной камеры

Конструкция новой компоновки приемной камеры четырехручьевой МНЛЗ (рис. 2, а) создана на базе донного металлоприемника с разгрузочными отверстиями и двух перегородок с переливными отверстиями на границе приемной камеры ПК МНЛЗ. Применение в ПК четырехручьевой МНЛЗ элементов разработанной системы распределения потоков стали обеспечивает гашение интенсивных скоростных поверхностных потоков в приемной камере ПК. На рис. 2, б показана компоновка четырехручьевой МНЛЗ на базе донного металлоприемника с разгрузочными отверстиями и четырех порогов с переливными отверстиями на границах приемной



Виктор В. Точилкин
 E-mail: toch56@mail.ru

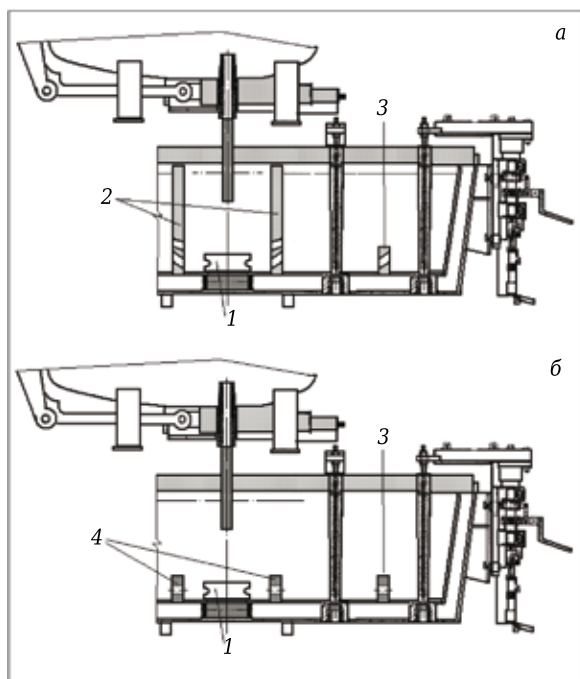


Рис. 2. Два варианта компоновки ПК четырехручьевой МНЛЗ после модернизации: 1 — донный металлоприемник с пространственно ориентированными отверстиями (ПОО); 2 — перегородки приемной камеры с ПОО; 3 — порог разливочной камеры с ПОО; 4 — пороги приемной камеры с ПОО

и разливочных камер ПК МНЛЗ. Применение в ПК четырехручьевой МНЛЗ данной системы распределения потоков стали также обеспечивает гашение интенсивных скоростных поверхностных потоков в приемной камере ПК.

На рис. 3 показана компоновка приемной камеры четырехручьевой МНЛЗ на базе донного металлоприемника с разгрузочными отверстиями. Пороги выполнены с ПОО, наклоненными на заданный угол, который определяется особенностями работы МНЛЗ и уровнем стали в ковше [5].

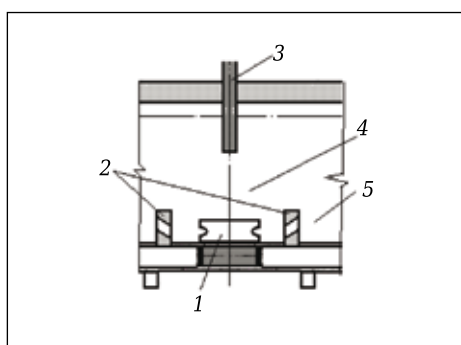


Рис. 3. Компоновка приемной камеры ПК четырехручьевой МНЛЗ после модернизации: 1 — донный металлоприемник с ПОО; 2 — пороги приемной камеры с ПОО; 3 — защитная труба сталеразливочного ковша; 4 — приемная камера ПК

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША

Несмотря на то, что описанные устройства давно применяются при разливке стали, обоснованные методики оценки их расчета и конструирования развиты недостаточно. В работах [1, 5] представлены оценки работоспособности таких устройств. Прежде всего, перелив стали через отверстия в перегородках не должен сопровождаться кавитационными процессами, следовательно, требуется расчет устройства на кавитацию [1]. Представлены также рекомендации относительно размеров отверстий, их расположения, совокупной площади сечения и т. д. [1]. В статье [5] 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 [6]. Расчет работоспособности перегородок и порогов 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, так как эрозионное разрушение вследствие химических реакций между огнеупорным материалом и расплавом наблюдается на уровне шлакового пояса [7]. Нагрузки на перегородку в районе шлакового пояса минимальны, и разрушение ее верхней части не приводит к серьезным нарушениям работы ПК. Сами пороги со шлаком не взаимодействуют [2].

Расчет устройств на кавитацию 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. При таком упрощении неизбежны ошибки, однако они направлены в сторону увеличения запаса прочности устройства [5].

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 напряжениям, полученным в результате расчета [8] или проведенного математического моделирования, можно рассчитать минимальную толщину конструкции оборудования ковша: порога, металлоприемника, перегородки [5, 9].

Проверка работоспособности по условию движения стали на границе раздела металл – шлак необходима, так как конструктивные особенности применяемых устройств [10] 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:

$$u_i \leq [u_i], \quad (1)$$

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

В работе [11] изучены причины 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 ПК происходит гораздо интенсивнее, поэтому значение допустимой скорости было уменьшено в 1,5 раза и составило $[u_i] = 0,13$ 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 [12]. Затопленные струи на некотором удалении от перегородки сливаются в сплошной поток, определить скорости металла в этом потоке можно, применив к струйным течениям принцип суперпозиций [2]:

$$\vec{u} = \sum_{i=1}^m \vec{u}_i, \quad (2)$$

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КОНСТРУКЦИЙ ПРИЕМНОЙ КАМЕРЫ КОВША

Задачи решали численными методами путем математического моделирования [13], при этом были описаны и смоделированы следующие процессы:

1. Движение потоков стали в объеме подсистемы струя металла из сталеразливочного ковша – металлоприемник с ПОО – струи металла в приемной камере ПК – пороги приемной камеры.

2. Распределение НВ при разливке стали в приемной камере ПК.

Математическая модель основана на уравнении Навье – Стокса для жидкого металла и уравнении неразрывности потока для несжимаемой жидкости [5].

Соответствующие уравнения имеют вид [9]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u}, \\ \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где \vec{u} — вектор скорости жидкости; \vec{F} — вектор объемных сил; p — давление жидкости; ∇p — градиент давления; ν — коэффициент кинематической вязкости; $\nabla^2 \vec{u}$ — лапласиан \vec{u} ; ρ — плотность стали.

В математической модели были сделаны допущения [14]:

- плотность каждой фазы (металла и НВ) в модели постоянна;
- объем сталеразливочного ковша изначально заполнен сталью полностью;
- объем ПК изначально заполнен сталью;
- жидкость (сталь) является вязкой и несжимаемой.

Было проведено математическое моделирование потоков жидкого металла [15] для оценки влияния потоков металла на конструкции оборудования приемной камеры ковша [16]. Это необходимо для представления рекомендаций по совершенствованию технологий разливки стали [17], огнеупорных конструкций ПК [18]. При анализе результатов моделирования оценивали параметры полных давлений (рис. 4) на поверхности порога приемной камеры в ПК, расположенного на границе приемной камеры ковша, и напряжений в пороге (рис. 5).

Представлены величины давлений на поверхности порога приемной камеры, возникающих под воздействием жидкой стали, находящейся в камере ковша, и потоков стали при максимально возможном рабочем уровне металла в ковше (см. рис. 4).

Установлен характер давлений, действующих на поверхностях конструкций, расположенных в приемной камере ПК, при использовании порогов с ПОО. Площадь ПОО и угол наклона их

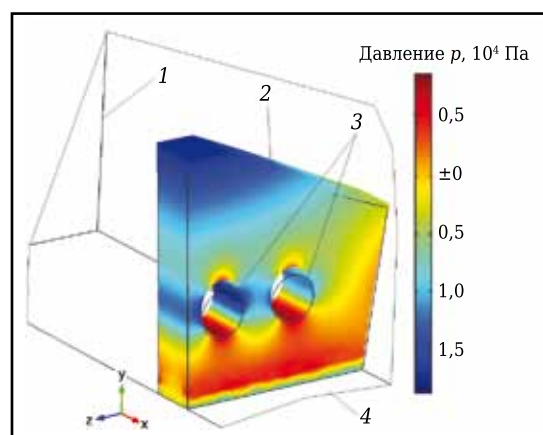


Рис. 4. Давление на поверхностях порога приемной камеры ковша: 1 — боковые поверхности ковша; 2 — огнеупорная конструкция – порог; 3 — переливные отверстия порога; 4 — дно приемной камеры ковша

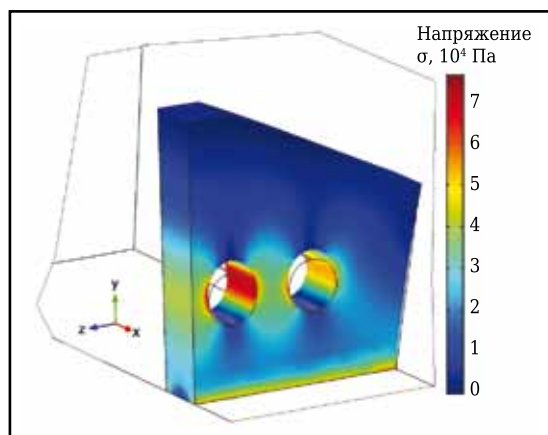


Рис. 5. Напряжения в элементах конструкций порога приемной камеры

осей определяли с учетом технологических параметров разливки (скорость движения стали из разливочного отверстия ковша, размер непрерывной заготовки). Результаты математиче-

Библиографический список

1. **Ефимов, В. А.** Технологии современной металлургии / В. А. Ефимов, А. С. Эльдарханов. — М.: Новые технологии, 2004. — 784 с.
2. **Vdovin, K. N.** Technologies for controlling flows of steel and the development of refractory structures for the tundish of a four-strand continuous caster / K. N. Vdovin, Viktor V. Tochilkin, Vasilii V. Tochilkin // *Refract. Ind. Ceram.* — 2016. — Vol. 57, № 1. — P. 6–8. DOI: 10.1007/s11148-016-9916-7.
3. **Вдовин, К. Н.** Технологии управления потоками стали и разработка огнеупорных конструкций для промежуточного ковша четырехручьевого МНЛЗ / К. Н. Вдовин, Виктор В. Тоцилкин, Василий В. Тоцилкин // *Новые огнеупоры.* — 2016. — № 2. — С. 3–5.
4. **Гущин, В. Н.** Совершенствование технологии рафинирования стали в промежуточных ковшах МНЛЗ / В. Н. Гущин, В. А. Ульянов // *Сталь.* — 2017. — № 5. — С. 16–20.
5. **Gushchin, V. N.** Improved tundish refining of steel in continuous-casting machines / V. N. Gushchin, V. A. Ul'yanov // *Steel in Translation.* — 2017. — Vol. 47, № 5. — P. 320–324. DOI: 10.3103/S0967091217050060.
6. **Бондаренко, И. В.** Освоение технологии производства круглой литой заготовки из колесной стали, предназначенной для производства цельнокатаных железнодорожных колес / И. В. Бондаренко, Е. М. Алексеев, К. В. Баранчиков [и др.] // *Бюллетень «Черная металлургия».* — 2015. — № 5. — С. 22–24.
7. **Вдовин, К. Н.** Разработка элементов приемной камеры промежуточного ковша слябовой МНЛЗ / К. Н. Вдовин, Е. А. Мельничук, А. В. Неведов [и др.] // *Изв. вузов. Черная металлургия.* — 2014. — № 3. — С. 23–27.
8. **Vdovin, K. N.** Intake chamber of the tundish in a continuous slab-casting machine / K. N. Vdovin, E. A. Melnichuk, A. V. Nefedov [et al.] // *Steel in Translation.* — 2014. — Vol. 44, № 3. — P. 186–189.
9. **Rogler, J. P.** Inclusion removal in a tundish by gas dubbing / J. P. Rogler, L. J. Heaslip, M. Mehrvar // *Can. Met. Quart.* — 2004. — Vol. 43, № 3. — P. 407–415.
10. **Kashcheev, I. D.** Developing refractory concretes of aluminosilicate- and alumina-based compositions for high-temperature equipment in ferrous metallurgy / I. D. Kashcheev, S. A. Pomortsev, A. A. Ryaplova // *Refract. Ind. Ceram.* — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 281–284. DOI: 10.1007/s11148-014-9708-x.
11. **Кащеев, И. Д.** Разработка огнеупорных бетонов алюмосиликатного и глиноземистого составов для тепловых агрегатов черной металлургии / И. Д. Кащеев, С. А. Поморцев, А. А. Ряплова // *Новые огнеупоры.* — 2014. — № 7. — С. 15–18.
12. **Сотников, А. Л.** Диагностирование электромеханического привода механизма качания кристаллизатора МНЛЗ / А. Л. Сотников // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* — 2016. — Т. 59, № 5. — С. 334–338. DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-334-338.
13. **Vdovin, K. N.** Improvement of the process of metal casting and the design of refractory equipment of the «tundish ladle – open jet – mold» system of a continuous billet-casting machine / K. N. Vdovin, Vasilii V. Tochilkin, O. A. Filatova [et al.] // *Refract. Ind. Ceram.* — 2018. — Vol. 59, № 3. — P. 237–240. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0213-5>.
14. **Вдовин, К. Н.** Совершенствование процесса разливки металла и конструкции огнеупорного оборудования системы промежуточный ковш – открытая струя – кристаллизатор сортовой МНЛЗ / К. Н. Вдовин, Василий В. Тоцилкин, О. А. Филатова [и др.] // *Новые огнеупоры.* — 2018. — № 6. — С. 3–7. DOI: <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2018-6-3-7>.
15. **Куклев, А. В.** Оптимизация гидродинамических характеристик промежуточного ковша УНРС с целью удаления экзогенных неметаллических включений / А. В. Куклев, В. В. Тиняков, Ю. М. Айзин [и др.] // *Металлург.* — 2004. — № 4. — С. 47–49.
16. **Kuklev, A. V.** Optimization of the hydrodynamic characteristics of tundishes in order to remove exogeneous

nonmetallic inclusions / A. V. Kuklev, V. V. Tinyakov, Yu. M. Aizin [et al.] // Metallurgist. — 2004. — Vol. 48, № 3/4. — P. 153–157. DOI: 10.1023/B:MELL.0000037176.66145.e8.

11. Перспективы исследований высокоскоростной непрерывной отливки обычных слэбов из углеродистой стали // Черметинформация. Приложение к изданию «Новости черной металлургии за рубежом». — 2002. — № 4. — С. 20–27.

12. **Вдовин, К. Н.** Непрерывная разливка стали. Гидромеханика машин непрерывного литья заготовок : монография / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, И. М. Ячилов. — Магнитогорск: Изд-во Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2014. — 348 с.

13. **Вдовин, К. Н.** Рафинирование металла в промежуточном ковше / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, М. В. Семенов [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. — 2007. — № 1. — С. 43–46.

14. **Vdovin, K. N.** Improving refractory constructions in the system «steel – pouring ladle – pouring basket» of CBCM / K. N. Vdovin, Vasilii V. Tochilkin, V. I. Umnov [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 3. — P. 255–258. DOI: 10.1007/s11148-017-0093-0.

Вдовин, К. Н. Совершенствование огнеупорных конструкций системы сталеразливочный ковш – промежуточный ковш МНЛЗ / К. Н. Вдовин, Василий В. Точилкин, В. И. Умнов [и др.] // Новые огнеупоры. — 2017. — № 6. — С. 29–32. DOI: 10.17073/1683-4518-2017-6-29-32.

15. **Вдовин, К. Н.** Синтез процесса разливки металла и конструкций огнеупорного оборудования системы сталеразливочный ковш – промежуточный ковш сортовой МНЛЗ / К. Н. Вдовин, Василий В. Точилкин, О. А. Филатова [и др.] // Новые огнеупоры. — 2018. — № 8. — С. 9–13. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2018-8-9-13>.

16. **Гущин, В. Н.** Технические решения по управлению потоками расплава в промежуточных ковшах МНЛЗ / В. Н. Гущин, В. А. Ульянов, В. А. Васильев // Металлург. — 2010. — № 9. — С. 45–47.

Gushchin, V. N. Technical solutions for controlling flows of melts in the tundishes of continuous casters / V. N. Gushchin, V. A. Ul'yanov, V. A. Vasiliev // Metallurgist. — 2011. — Vol. 54, № 9/10. — P. 591–593. DOI: 10.1007/s11015-011-9344-3.

17. **Odenthal, H.-J.** Numerical and physical of tundish flow phenomena / H.-J. Odenthal, R. Bolling, H. Pfeifer // Steel Res. Int. — 2003. — Vol. 74, № 1. — P. 20, 44–55.

18. **Вдовин, К. Н.** Рафинирование металла в промежуточном ковше / К. Н. Вдовин, В. В. Точилкин, М. В. Семенов [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. — 2007. — № 1. — С. 43–46. ■

Получено 15.04.19

© К. Н. Вдовин, Василий В. Точилкин,
О. А. Филатова, Виктор В. Точилкин, 2019 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



ISBB 2019 — 20th International Symposium on Boron, Borides and Related Materials

ISBB 2019

22--27 сентября 2019 г.
Ниигата, Япония

<http://www.sogalabo.jp/isbb2019/>