

С. Б. Бойченко, Б. М. Бойченко /д. т. н./,  
Е. В. Синегин, Л. С. Молчанов /к. т. н./  
Национальная металлургическая академия  
Украины

## Возможности удаления водорода из непрерывнолитых флокеночувствительных сталей в промежуточном ковше

Приведены схема размещения в днище промежуточного ковша МНЛЗ, конструкция и режимы эксплуатации пористых продувочных блоков, предназначенных для улучшения качества разливаемых флокеночувствительных сталей. (Ил. 4. Библиогр.: 5 назв.).

**Ключевые слова:** промежуточный ковш, машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), флокеночувствительная сталь, водород, неметаллические включения, аргон

*The scheme of placing at the bottom of the tundish CCM, the design and modes of operation of porous blowing tuyeres designed to improve the quality of casting flakesensible steel grades.*

**Key words:** tundish, continuous casting machine (CCM), flakesensible steel grades, hydrogen, non-metallic inclusions, argon

### Актуальность исследования

Промежуточный ковш (промковш) машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) всё в большей степени становится завершающим звеном в процессе рафинирования жидкой стали, в том числе от водорода, непосредственно перед её кристаллизацией [1; 2]. Эффективность технологических операций по удалению водорода, неметаллических включений и гомогенизации жидкой ванны в высокой степени зависит от характера и стабильности потоков жидкой стали в промковше.

С этой позиции благоприятная гидродинамика жидкой ванны в промковше создает возможность повышения качества непрерывнолитой заготовки.

### Постановка задачи исследования

При отслеживании поэтапного изменения содержания в флокеночувствительных сталях водорода [H] авторы обнаружили следующее. При исходном [H] = 5,0 ppm перед дегазацией его концентрация при вакуумировании постепенно снижается до 0,5–1,0 ppm, однако возрастает до 4,0 ppm в промковше на первых 5 плавках разливаемых серий и нестабильно колеблется в пределах 1,5–2,5 ppm на плавках последующих. Таким образом, «виновниками» возрастания [H], прежде всего на первых плавках в серии, и связанной с этим отбраковки по флокенам являются условия пребывания стали в промковше.

В настоящей статье освещаются результаты работы, направленной на устойчивое снижение [H] перед кристаллизацией – ниже уровня

2,0 ppm, исключаяющего риск отбраковки заготовки по флокенам, с одновременным очищением стали от трудно удаляемых крупных неметаллических включений.

Повышение расхода аргона, вдуваемого в жидкую сталь, является средством удаления из неё водорода за счёт, во-первых, разницы его парциальных давлений в металле и пузырьке газа и, во-вторых, как результат перемешивания, что одновременно ускоряет коагуляцию, всплытие неметаллических включений в шлак и стабилизирует жидкие потоки по составу и температуре.

Однако вдувание аргона и гидродинамика расплава в промковше должны исключать вовлечение в потоки стали неметаллических включений из шлака.

### Результаты исследования

Проведено моделирование процессов в физической изотермической модели промковша, изготовленной в масштабе 1:10 в соответствии с линейными размерами прототипа емкостью 38 т по критерию Фруда (Fr). Сталь имитировали водой, шлак – бензолом (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) марки «ПС» по ГОСТ 9572–93. По характеру смачивания этими жидкостями неметаллических включений определен имитатор включений – тонкодисперсный графит. Подачу нейтрального газа моделировали использованием воздуха. Получили вероятное распределение векторов скоростей движения потоков жидкой стали при различном расположении пористых продувочных блоков. Целью планирования экспериментов в

соответствии с п-теоремой являлась организация за счет режимов донной подачи аргона течения потоков жидкости в промковше с тем, чтобы они перемещались в верхних горизонтах преимущественно вдоль зеркала по направлению от металлоприемника к торцам промковша и в обратном направлении к стаканам-дозаторам преимущественно в нижних горизонтах.

Зафиксирована (рис. 1), как и в работе [3], картина воздействия потоков жидкости и газа, при которой над дутьевым устройством поднимается «султан» воды (расплава), с которого частично стекает бензол (шлак). В обычных условиях эксплуатации промковша слой шлака относительно тонкий и может быть легко отодвинут в сторону с «оголением» расплава и образованием так называемого «глаза» круглой формы с гораздо большей поверхностью, чем «султан» (рис. 2). Установлено [3], что скорость обратных потоков  $W_{об}$  связана со скоростью потоков газожидкостной смеси  $W_{г.ж.}$  поднимающейся вверх над дутьевым устройством, зависимостью:

$$W_{об} = \frac{S_c}{(S_2 - S_c) \cdot \cos \theta} \cdot W_{г.ж.} \quad (1)$$

где  $S_c$  и  $S_2$  – соответственно, площадь «султана» у межфазной границы «жидкость – газ» и оголенной жидкости («глаза»).

Скорость потоков жидкости  $W_{г.ж.}$  и  $W_{об}$  у зеркала металла, по нашим данным, не превышает 0,015 м/с, а угол  $\theta$  изменяется в пределах 18–20°, то есть активных перемешиваний металла со шлаком и вовлечения неметаллических включений вниз не происходит. Расчёты показали, что скорость всплывания крупных включений (более 60 мкм), существенно превышает величину  $W_{об}$ .

Следует подчеркнуть, что «оголение» металлического расплава на площади  $S_2$  в рассматриваемом случае не приведет к окислению его газовой фазой, обычно имеющего место на уста-

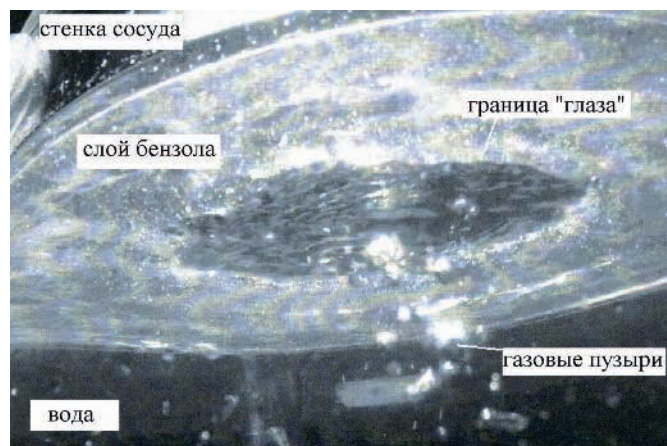


Фото выполнено снизу под углом 60° к горизонтали

Рис. 1. «Оголение» поверхности воды (имитация жидкой стали) от бензола (жидкий шлак)

новках ковш-печь, из-за наличия достаточно стабильного демпферного слоя аргонной защиты над ним, удерживаемой крышкой промковша.

Гидродинамику расплава в промковше шестиручьевой МНЛЗ применительно к разливке флокеночувствительных высокопрочных сталей уточняли посредством математического моделирования, учитывающего адекватную картину потоков в широком диапазоне чисел Рейнольдса. В основу математической модели были положены уравнения гидродинамики, представляющие собой математические операторы: законов сохранения массы жидкости; второго закона Ньютона (изменение импульса равно сумме сил, действующих на жидкость); первого закона термодинамики (изменение энергии равно сумме дополнительных теплоты и работы, выполняемых над жидкостью) [4]. Входные параметры для расчётов изменяли в соответствии с результатами физического моделирования и исходя из собственного практического опыта.

Математическое моделирование дополнило схему целесообразной гидродинамики при пе-

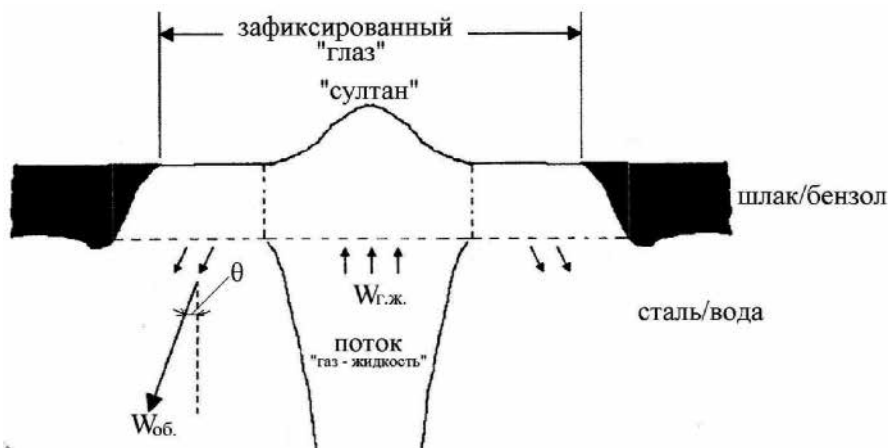


Рис. 2. Схема процессов стекания бензола (шлака) с поверхности «султана» воды (жидкой стали) и вовлечения части бензола в обратные потоки [3]

## СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

ремещении стали в проковше (рис. 3–4), расположения дутьевых устройств, их конструкцию, режимы подачи аргона от плавки к плавке в непрерывной серии для стабильного получения содержания  $[H] \leq 2 \text{ ppm}$ , векторов скоростей и суммарной скорости потоков расплава, неметаллических включений и пузырьков газов.

Исходным для создания геометрической модели расчётной области был принят шестиручьевой проковш, оборудованный системой подвода аргона для вдувания в жидкую сталь, металлоприёмником (типа «turbostop») «ведерообразного» типа. В качестве расчётной области при создании геометрической модели принят внутренний объём проковша, занимаемый жидкой сталью.

Организация гидродинамики потоков стали в проковше в соответствии с рис. 3 за счёт режимов донной подачи аргона обеспечивает достижение поставленной при физическом и ма-

тематическом моделировании цели. При такой схеме потоки расплава многократно обрабатываются аргоном для удаления водорода и транспортировки неметаллических включений к слою шлака. Этому в определённой мере способствует новая конструкция продувочного блока (рис. 4), не имеющая пор для подачи аргона по обе стороны от оси проковша на расстоянии  $m = \frac{1}{3}L$ .

Интенсивность подачи аргона  $I_{Ar}$  в проковш через донные пористые устройства должна быть максимальной на первых 1–5 плавках непрерывной серии при разливке флокеночувствительных сталей и уменьшаться по мере снижения (как нами обнаружено в [1]) приходной части материального баланса водорода вследствие дообжига футеровки, составляющих шлака при контакте с жидким металлом и появления над ним аргонной прослойки, защищающей от контакта с атмосферой.

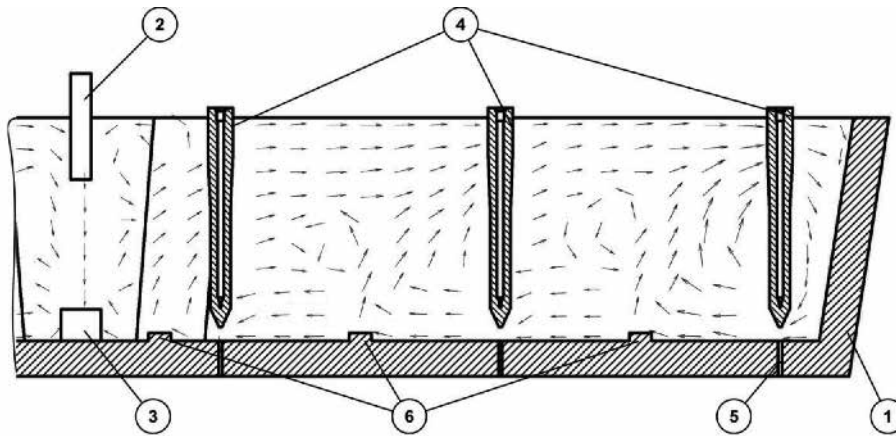


Рис. 3. Схема циркуляционных потоков жидкой стали в проковше МНЛЗ предложенной конструкции:

- 1 – проковш; 2 – защитная труба; 3 – турбостоп; 4 – стопоры;  
5 – разливочный стакан; 6 – продувочные блоки

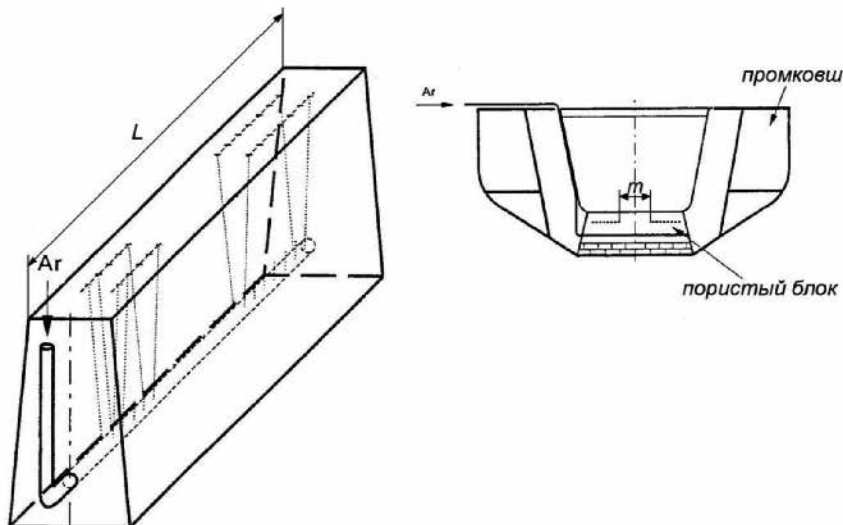


Рис. 4. Конструкция продувочного блока промежуточного ковша

После статистической обработки данных промышленного производства флокеночувствительных сталей, при которой оценены приходные и расходные статьи баланса водорода от плавки к плавке в серии [5], разработаны следующие рекомендации для определения интенсивности продувки аргоном в пузырьковом режиме сквозь пористые блоки  $I_{Ar}$ . При разливке первой плавки в серии продувку осуществляют с расходом аргона  $7,1 \div 7,8$  дм<sup>3</sup>/(т мин), при разливке следующих четырёх плавков расход аргона  $I_{Ar}$  на 1 т ёмкости ковша выдерживают в соответствии с уравнением:

$$I_{Ar} = (7,1 \div 7,8) \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot n \cdot a \times b \cdot V \cdot \tau}}, \text{ дм}^3/(\text{т мин}), \quad (2)$$

где  $7,1 \div 7,8$  – удельный расход инертного газа при разливке первой плавки, дм<sup>3</sup>/(т мин);  $E$  – ёмкость сталеразливочного ковша, т;  $\rho$  – плотность твёрдой стали, т/м<sup>3</sup>;  $n$  – число рабочих ручьёв МНЛЗ;  $a \times b$  – соответственно, толщина и ширина заготовки, м;  $V$  – рабочая скорость вытягивания заготовок, м/мин;  $\tau$  – длительность разливки, мин.

А при разливке последующих плавков и до конца серии  $I_{Ar}$  сохраняется в пределах  $3,2-3,5$  дм<sup>3</sup>/(т мин).

#### Выводы

С привлечением методов физического и математического моделирования, статистической обработки результатов непрерывной разливки флокеночувствительных сталей разработана схема размещения и режимы эксплуатации пористых продувочных блоков, а также конструк-

ция последних, устанавливаемых в днище промежуточного ковша МНЛЗ. Это создает возможности для удаления водорода и неметаллических включений из жидкой стали и получения достаточно однородного её состав при поступлении в кристаллизаторы.

#### Библиографический список

1. Бойченко С. Б. Механизм и кинетика процессов, определяющих содержание водорода в стали в промежуточном ковше МНЛЗ / С. Б. Бойченко, Ю. С. Пройдак, Б. М. Бойченко // Процессы литья. – 2013. – № 3. – С. 12-16.
2. Непрерывная разливка сортовой заготовки / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, А. Л. Подкорыгов [и др.]. – Донецк: Цифровая типография, 2012. – 417 с.
3. K. Krishnakumar. A Model Study of Slag Eye Formation during Gas Purging at the Surface of a Metall Bath / K. Krishnakumar and G. A. Irons. // The 3<sup>rd</sup> International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, May 9-12, 2005, Charlotte, North Carolina, USA. – JCS Proceedings. – 2005. – P. 833-844.
4. Jiguan Tu. Computational Fluid Dynamics of Practical Approach / Tu Jiguan, Guan Heng Yeoh, Chaugun Liu. – P. 65-105.
5. Бойченко С. Б. К вопросу о качестве непрерывнолитых заготовок высокопрочных сталей / С. Б. Бойченко, Е. В. Синегин // Актуальные проблемы современной металлургии. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2012. – С. 208-217.

Поступила 01.10.2015

