

УДК 621.746.047

**А. Н. Смирнов, А. П. Верзилов, В. Г. Ефимова*,
Д. И. Гойда, Р. В. Пильгаев**

Донецкий национальный технический университет, Донецк

*Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ И ИЗНОСА МЕТАЛОПРИЕМНИКОВ В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШАХ МНОГОРУЧЬЕВЫХ МНЛЗ

Выполнен анализ особенностей работы промежуточных ковшей на многоручьевых сортовых МНЛЗ при разливке стали сверхдлинными сериями. Показана роль конструкции металлоприемника в части обеспечения рационального движения циркуляционных потоков в жидкой ванне промежуточного ковша. Разработана физическая модель и выполнен выбор рабочих сред, обеспечивающих совмещенную оценку динамики развития конвективных потоков при условии размывания отдельных элементов металлоприемника. Показано, что разработанная физическая модель позволяет выполнять сравнительные качественные оценки динамики размывания металлоприемников различных конструкций и степени трансформации циркуляционных потоков в жидкой ванне промежуточного ковша.

Ключевые слова: непрерывная разливка, многоручьевая МНЛЗ, промежуточный ковш, металлоприемник, физическая модель, циркуляционный поток.

Виконано аналіз особливостей роботи проміжних ковшів на багаторівчавкових сортових МБРЗ при розливанні сталі наддовгими серіями. Показано роль конструкції металоприймача в частині забезпечення раціонального руху циркуляційних потоків в рідкій ванні проміжного ковша. Розроблено фізичну модель і виконано вибір робочих середовищ, які забезпечують поєднану оцінку динаміки розвитку конвективних потоків за умови розмивання окремих елементів металоприймача. Показано, що розроблена фізична модель дозволяє виконувати порівняльні якісні оцінки динаміки розмивання металоприймача різних конструкцій і ступеня трансформації циркуляційних потоків в рідкій ванні проміжного ковша.

Ключові слова: безперервне розливання, багаторівчавкова МБРЗ, проміжний ківш, металоприймач, фізична модель, циркуляційний потік.

There was done the analysis of the features of the tundish to the multi-grooved billet caster for casting steel extra-long series. Also was shown the role of design in terms of the metal reservoir to ensure the rational traffic flow patterns in a liquid bath of the tundish. A physical model is made and working environments are chosen, providing a combined assessment of the dynamics of convective flows provided erosion of individual elements of the metal reservoir. It is shown that the developed

physical model allows comparative qualitative assessment of the dynamics of various designs hearth erosion and the degree of transformation of flow patterns in a liquid bath of the tundish.

Keywords: *continuous casting, continuous casting machine, tundish, hearth, physical model, circulation flow.*

Важным направлением деятельности металлургических предприятий является тотальная минимизация издержек на всех технологических этапах с целью обеспечения конкурентоспособности собственной продукции. При непрерывной разливке стали на сортовую заготовку особое внимание уделяется достижению максимальной производительности машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и увеличению серийности разливки из одного промковша. Достигнутые в настоящее время показатели серийности, составляющие 70-100 плавов и более, обеспечиваются посредством рациональной организации движения конвективных потоков в жидкой ванне промежуточного ковша, в том числе за счет установки металлоприемников специальной конструкции и различного рода перегородок [1-4].

Между тем выбор металлоприемника определенной конфигурации или места расположения перегородок в случае разливки сверхдлинными сериями требует комбинированного подхода, который должен учитывать изменение гидродинамики движения конвективных потоков во времени по мере износа отдельных элементов металлоприемника. Такая задача представляется тем более актуальной, поскольку на практике достаточно трудно выполнять количественные оценки текущего износа элементов футеровки промковша и металлоприемника без остановки МНЛЗ.

Целью настоящего исследования является разработка физической модели и выбор рациональных рабочих сред для проведения моделирования, обеспечивающих совмещенную оценку динамики развития конвективных потоков в промежуточном ковше при условии размывания отдельных элементов металлоприемника, что позволяло бы идентифицировать наиболее уязвимые места при его износе.

Учитывая тот факт, что в металлургической практике высокопроизводительные сорта МНЛЗ имеют, как правило, 4 ручья и более, а разливка ведется открытой струей, то промежуточные ковши таких машин оснащаются металлоприемниками колодцеобразного типа. Единого мнения на вопросы оптимизации конструкции таких металлоприемников не существует, что следует связывать с различной конфигурацией и объемом промковшей, а также условиями разливки (в том числе и удельный расход стали, подаваемой в промковш).

Между тем большинство металлоприемников, используемых на практике при разливке на многоручьевых МНЛЗ, представляет собой монолитную конструкцию колодцеобразного типа с выходными окнами или отверстиями, которые находятся со стороны узких стенок. Обычно такие отверстия и окна располагают в верхней части металлоприемника, что обеспечивает движение вытекающих из него потоков вдоль зеркала металла к дальним ручьям. Это обеспечивает эффективное усреднение стали по температуре и химическому составу и увеличивает длительность ее пребывания в промежуточном ковше, способствуя всплытию шлаковых включений [5-6].

Как показывает практика, при разливке сверхдлинными сериями эксплуатационная стойкость футеровки промежуточного ковша лимитируется преимущественно локальным износом днища металлоприемника в зоне падения струи, вытекающей из сталеразливочного ковша. В некоторых случаях вначале происходит размывание окон металлоприемника, что приводит к его частичному разрушению и ускоряет локальный износ футеровки промежуточного ковша.

Используемая в настоящих исследованиях физическая модель была изготовлена из светопрозрачного материала (оргстекла) в масштабе модели 1:6 по отношению к промышленному промковшу 6-ти ручьевого сортовой МНЛЗ (масса металла в промежуточном ковше 32-34 т). При выборе масштаба модели руковод-

Гидродинамика процессов литья

связывались соображениями снижения трудоемкости процесса моделирования и временной продолжительности процесса размывания металлоприемника. Подобие гидродинамических процессов, протекающих в модели и промышленном объекте, достигалось соблюдением критериев Фруда и Вебера, которые рекомендуются к использованию при моделировании процессов движения конвективных потоков в промковше многими исследователями [7-10].

В качестве рабочей жидкости, моделирующей жидкую сталь, использовалась вода при температуре 18-25 °С, так как значения вязкости воды и стали в области температур внепечной обработки и разливки достаточно близки друг к другу. Движение потоков жидкости в промковше фиксировалось с помощью цифровой видеокамеры и подкрашивания локальных объемов воды, вытекающей из сталеразливочного ковша цветными чернилами. Схема лабораторной установки представлена на рис. 1.

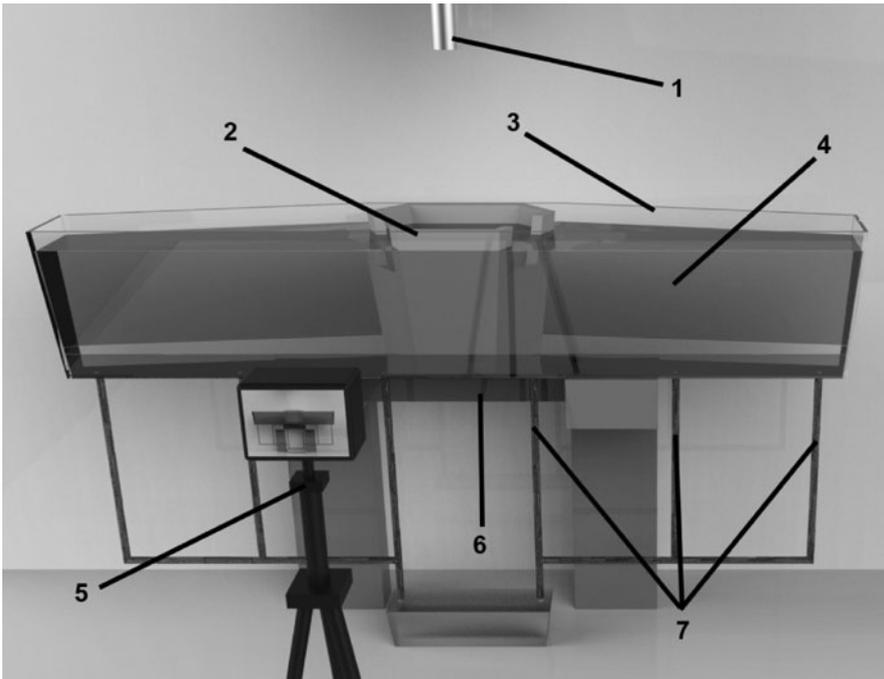


Рис. 1. Общий вид физической модели 6-ти ручьевого промежуточного ковша: 1 – подвод моделирующей жидкости; 2 – металлоприемник; 3 – промежуточный ковш; 4 – моделирующая жидкость в промковше; 5 – видеокамера; 6 – опорная конструкция; 7 – выходы стаканов-дозаторов

Рабочий материал для изготовления металлоприемников был выбран из следующих соображений: вещество должно сравнительно быстро растворяться в воде под воздействием конвективных потоков и при этом сохранять прочностные свойства для испытываемого изделия. С учетом известного опыта по физическому моделированию процессов затвердевания слитков и отливок [11], а также дополнительного требования, касающегося низкой температуры плавления вещества, в работе использовали тиосульфат натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), физико-химические свойства которого приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-химические свойства тиосульфата натрия

Молярная масса, г/моль	Растворимость в воде при 20 °С, %	Растворимость в воде при 80 °С, %	Плотность, г/см ³	Температура плавления, °С	Температура разложения, °С
248,17	41,2	69,86	1,715	48,5	220

Для моделирования процессов размывания металлоприемников и влияния их эксплуатационного износа на изменение гидродинамической картины внутри промежуточного ковша были выбраны несколько конструкций, которые хорошо зарекомендовали себя в промышленных условиях на металлургическом предприятии.

Каждая опытная модель металлоприемника изготавливалась посредством заливки рабочего вещества в специально подготовленную литейную форму. Заливка тиосульфата натрия в форму осуществлялась сверху с использованием фильтра, что исключало попадание в тело модели различного рода инородных частиц. В процессе затвердевания по мере падения уровня жидкой ванны производилась доливка тиосульфата с целью исключения образования пустот и усадочных раковин в теле модели. На протяжении следующих 48 ч отливка охлаждалась и выдерживалась при комнатной температуре. Далее в полученной отливке выпиливались окна для вытекания жидкости, а также дорабатывалась внутренняя конфигурация.

Для проведения экспериментов модель металлоприемника устанавливали в пустой промежуточный ковш, а затем начинали подачу воды из сталеразливочного ковша. После каждых 120 с разлики процесс истечения воды из сталеразливочного ковша прекращался, а металлоприемник извлекали из промковша для визуальных обследований, фотографирования и замеров износа. Затем промковш заново наполняли водой до номинального уровня, а металлоприемник устанавливали в первоначальное положение и разливку продолжали. Такая последовательность операций позволила минимизировать погрешность в результатах исследования, которая могла быть связана с дополнительным размыванием днища и нижней части стенок металлоприемника в процессе наполнения промковша водой.

Проведенные исследования позволили получить общую картину и динамику износа металлоприемников во времени, а так же выявить наиболее эффективные решения, которые обеспечивают их высокую стойкость (рис. 2). Наиболее характерные зоны износа металлоприемников обозначены на рис. 2 цифрами. Обобщение выполненных исследований приведено в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение результатов размывания наиболее характерных зон износа испытываемых металлоприемников

Параметры	Конструкция металлоприемника			
	А	Б	В	Г
Толщина днища, мм	33	43	43	50
Время работы до пробоя днища, мин	9	8	10	12
Средняя скорость износа, мм/мин	3,67	5,38	4,3	4,17
Основные зоны износа: сливных окон; нижней трети; шлакового пояса	– ± –	+ + +	+ ++ +	± – –

Обозначения: «+++» – размывание происходит примерно с той же скоростью, что размывание днища; «+» – размывание носит ярко выраженный характер и составляет 40-60 % от скорости износа днища; «±» – размывание носит заметный характер и составляет 15-25 % от скорости размывания днища; «–» – размывание практически отсутствует

Установлено, что основной областью износа металлоприемников всех испытываемых конфигураций является зона днища. Динамика размывания металлоприемника (кон-

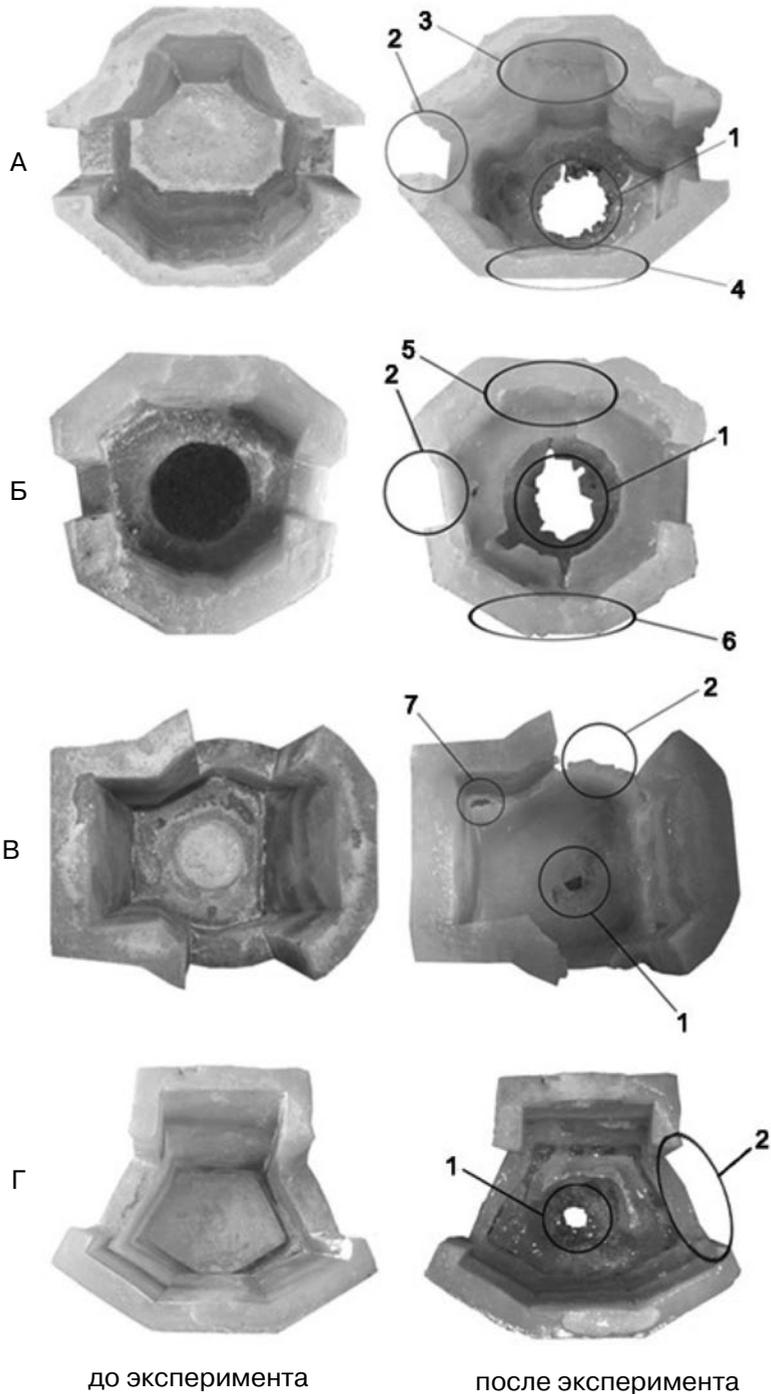
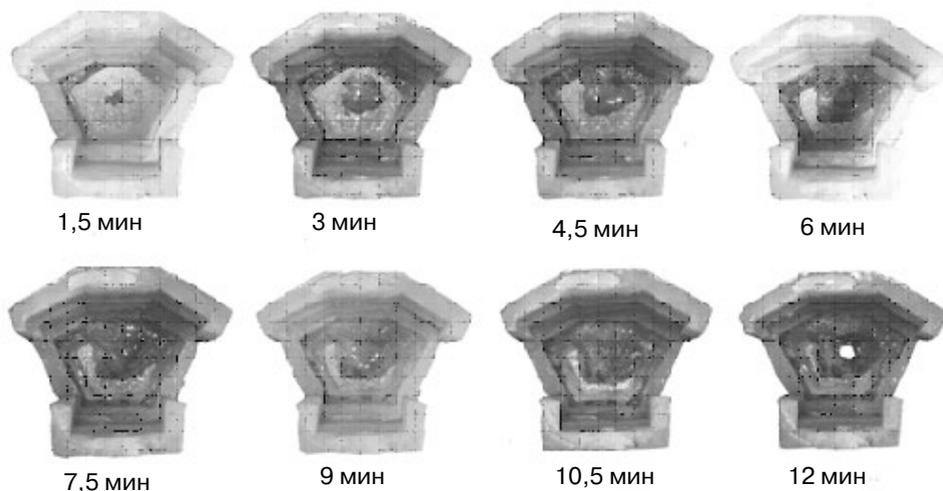
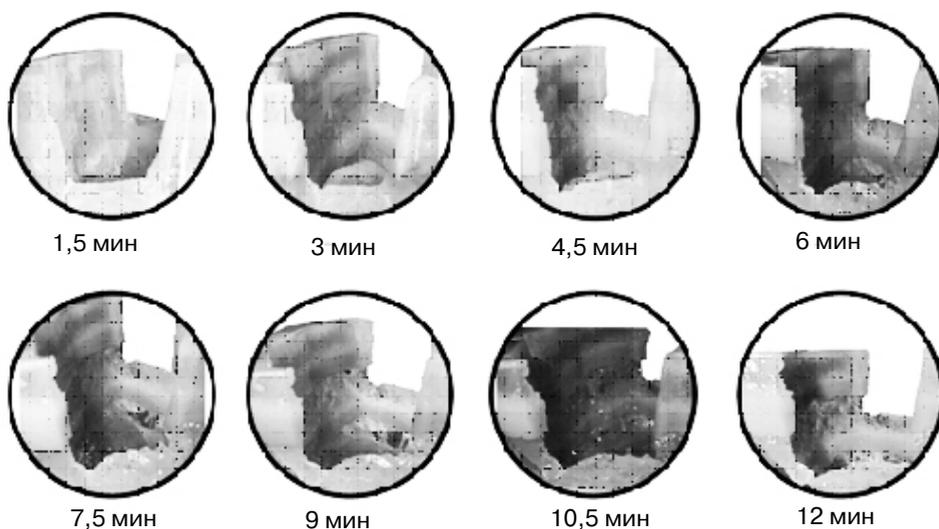


Рис. 2. Внешний вид металлоприемников конструкций А, Б, В, Г перед разливкой (слева) и после размывания (справа): 1 – зона дна; 2 – сливные окна; 3 – зона верхней трети передней стенки; 4 – зона верхней трети задней стенки; 5 – зона выше юбки турбостоба задней стенки; 6 – зона выше юбки турбостоба передней стенки; 7 – зона сопряжений передней стенки с цилиндрической частью



а



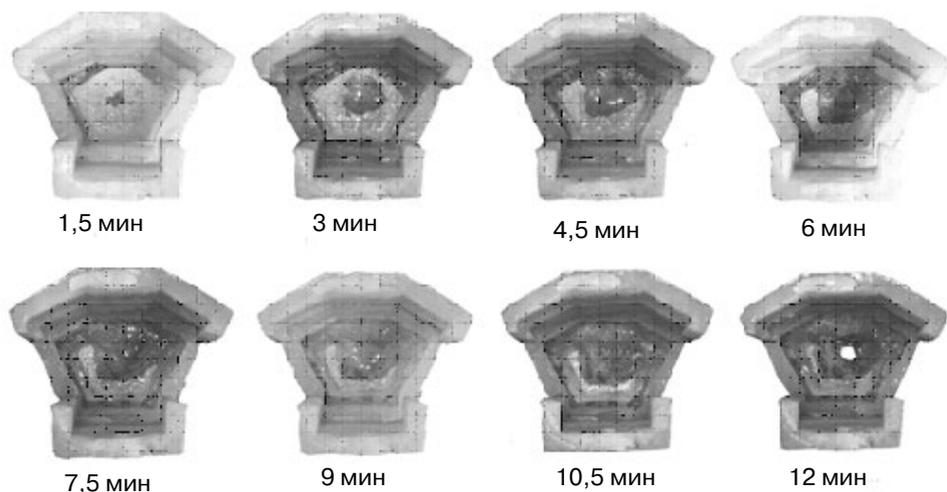
б

Рис. 3. Динамика размывания донной части (а) и выходных окон (б) металлоприемника конструкции Г

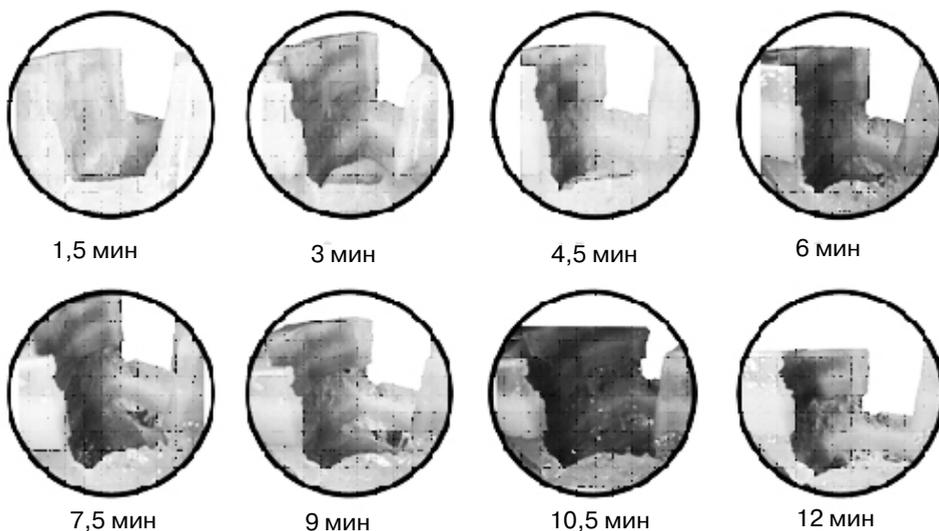
струкция Г) представлена на рис. 3, а. При этом длительность работы испытываемых металлоприемников до момента пробоя днища колебалась в диапазоне 8-12 мин.

В ходе визуальных наблюдений установлено, что в период заполнения промежуточного ковша в результате прямого воздействия падающей струи, истекающей из сталеразливочного ковша, с днищем металлоприемника происходит его заметный износ. Для компенсации такого износа в днище металлоприемника может предусматриваться дополнительное утолщение. Именно эта конструкционная особенность обусловила более высокую общую эксплуатационную стойкость металлоприемника конструкции Г в сравнении с другими изделиями.

Обобщая результаты оценки размывания выходных отверстий металлоприемника в процессе разливки (рис. 3, б) следует отметить, что их износ может носить неравномерный характер и оказывать существенное влияние на развитие конвективных потоков в жидкой ванне промежуточного ковша. На рис. 4 проиллюстрирована трансформация траекторий движения конвективных потоков в жидкой ванне про-



а



б

Рис. 3. Динамика размывания донной части (а) и выходных окон (б) металлоприемника конструкции Г

струкция Г) представлена на рис. 3, а. При этом длительность работы испытываемых металлоприемников до момента пробоя дна колебалась в диапазоне 8-12 мин.

В ходе визуальных наблюдений установлено, что в период заполнения промежуточного ковша в результате прямого воздействия падающей струи, истекающей из сталеразливочного ковша, с днищем металлоприемника происходит его заметный износ. Для компенсации такого износа в днище металлоприемника может предусматриваться дополнительное утолщение. Именно эта конструктивная особенность обусловила более высокую общую эксплуатационную стойкость металлоприемника конструкции Г в сравнении с другими изделиями.

Обобщая результаты оценки размывания выходных отверстий металлоприемника в процессе разливки (рис. 3, б) следует отметить, что их износ может носить неравномерный характер и оказывать существенное влияние на развитие конвективных потоков в жидкой ванне промежуточного ковша. На рис. 4 проиллюстрирована трансформация траекторий движения конвективных потоков в жидкой ванне промежуточного ковша по мере размывания окон металлоприемника (конструкция Б).

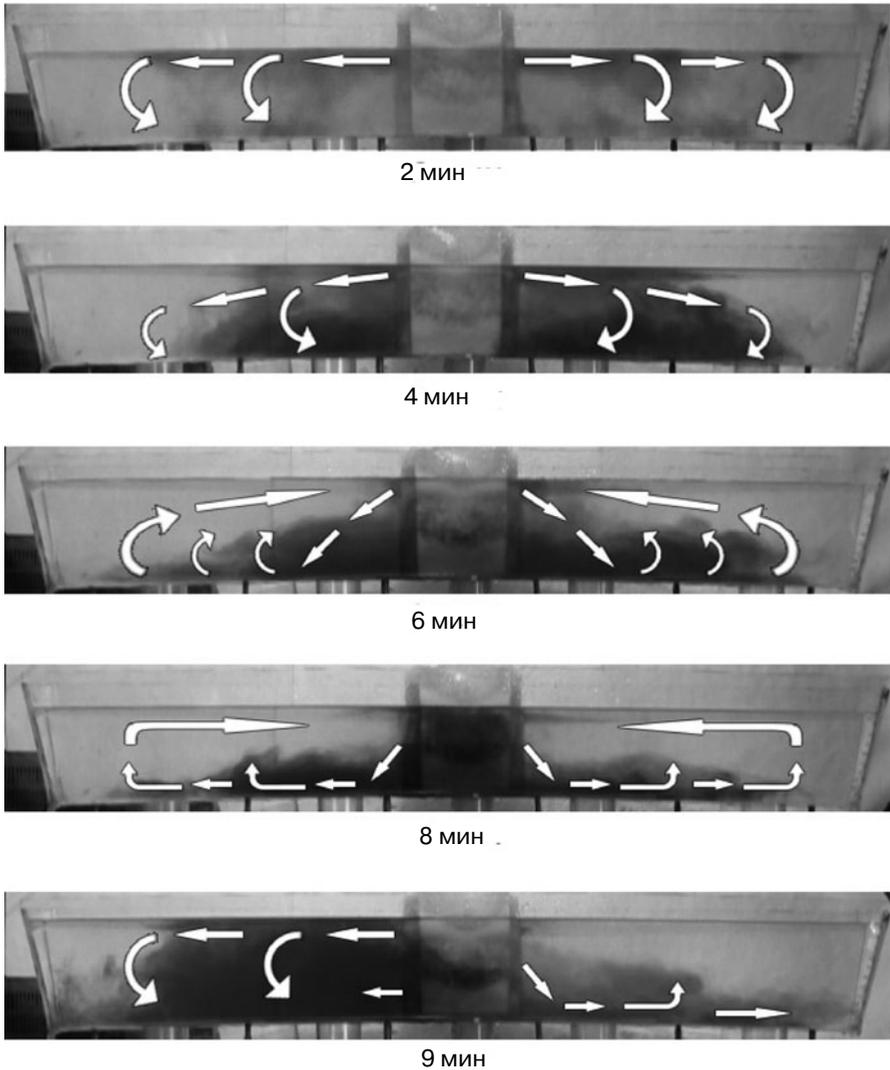


Рис. 4. Трансформация характера движения конвективных потоков при размывании металлоприемника конструкции Б в процессе разливки (под фотографиями указано время пробы днища с начала разливки)

Следует обратить дополнительное внимание на тот факт, что в начальный период разливки, выходящие из металлоприемника потоки, двигаются в верхней части жидкой ванны промежуточного ковша вдоль зеркала. Такое движение потоков металла представляется наиболее предпочтительным с точки зрения усреднения жидкой ванны по температуре, а также в плане всплывания шлаковых включений. По мере износа стенок выходных окон истечение потоков происходит вглубь жидкой ванны, что ухудшает гидродинамическую картину и снижает степень усреднения металла. Далее на временном отрезке 6-8 мин и более выходящие из металлоприемника потоки направляются преимущественно вниз, что можно рассматривать как свидетельство размывания окон металлоприемника в нижней их части. На практике это приводит к попаданию наиболее горячих порций металла в средние ручки. В случае разливки на многоручьевых МНЛЗ разница между температурой стали на центральных и крайних ручьях может достигнуть 20-25 °С, что в длительном временном отрезке будет дестабилизировать процесс литья, приводя к прорывам твердой корочки под кристаллизаторами на центральных ручьях.

Как показали наблюдения за характером размывания выходных окон у всех металлоприемников, значительная трансформация конвективных потоков наблюдается уже через 0,4-0,5 общего времени разливки. Так для металлоприемника конструкции А размывание окон было минимальным и равномерным, что не повлекло существенных изменений в движении конвективных потоков. Высокая стойкость стенок выходных окон объясняется, видимо, значительным утолщением двух боковых стенок в области расположения окон. Между тем при разливке с металлоприемниками конструкции Б и В заметное отклонение траектории движения конвективных потоков от начальных наблюдалось при размывании боковых стенок.

Таким образом, разработанная физическая модель позволяет выполнять сравнительные, качественные и количественные оценки влияния степени размывания металлоприемника на характер движения циркуляционных потоков в жидкой ванне промежуточного ковша.

Выводы

Важным аспектом, позволяющим повысить стойкость футеровки промежуточного ковша при разливке сверхдлинными сериями на МНЛЗ, является грамотное управление конвективными потоками жидкого расплава в его рабочем пространстве. В металлургической практике применяются специальные металлоприемники, которые позволяют не только снизить динамическую нагрузку на футеровку, возникающую при интенсивном движении потоков, но и оптимизировать процессы перемешивания и рафинирования металла, протекающие в промежуточном ковше.

Разработана физическая модель и выполнен выбор рациональных рабочих сред, обеспечивающих совмещенную оценку динамики развития конвективных потоков при условии размывания отдельных элементов металлоприемника. Выполнено моделирование процессов размывания металлоприемников различной конструкции и идентифицированы основные зоны износа. Проведенные исследования позволили получить общую картину и динамику износа металлоприемников во времени, а также выявить наиболее эффективные решения, которые обеспечивают их высокую стойкость.

Установлено, что наиболее характерными зонами износа металлоприемников являются днище и выходные окна. При этом в период заполнения промежуточного ковша в результате прямого воздействия падающей струи, истекающей из сталеразливочного ковша, с днищем металлоприемника происходит его заметный износ. Для компенсации такого износа в днище металлоприемника целесообразно предусматривать дополнительное утолщение.

Значительная трансформация конвективных потоков в жидкой ванне промежуточного ковша наблюдается уже через 0,4-0,5 от общего времени разливки. Высокая стойкость стенок выходных окон может быть достигнута за счет рациональной конфигурации выходных окон и посредством утолщения боковых стенок. Установлено, что более высокая эксплуатационная стойкость металлоприемника достигается в том случае, когда его конструкция имеет простую геометрическую форму без криволинейных сопряжений и переходов.



Список литературы

1. Wolf M. Bloom and Billet Casting: Overview / M. Wolf // Proceedings 3rd European Conference on Continuous Casting, Madrid (Spain), October 20-23, 1998. – Madrid: – 1998. – P. 515-524.
2. Непрерывная разливка сортовой заготовки / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, А. Л. Подкорытов и др. – Донецк: Цифровая типография, 2012. – 417 с.
3. Смирнов А. Н., Подкорытов А. Л., Кравченко А. А. Оптимизация движения конвективных потоков в проковшах многооручьевых МНЛЗ при разливке сверхдлинными сериями / Черная металлургия. – 2012. – №11. – С. 39-42.

4. *Sahai Y., Emi T.* Tundish Technology for Clean Steel Production. – New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. – 2008. – 316 p.
5. Совершенствование конструкции металлоприемника промежуточного ковша для разлива стали сверхдлинными сериями / А. Н. Смирнов, А. В. Кравченко, А. Л. Подкорытов, А. П. Верзилов // ОАО «Черметинформация». Бюл. Черная металлургия. – 2011. – № 6. – С. 44-47.
6. Fluid Flow and Mixing in a Six Strand Billet Tundish: A Parametric Study / P. K. Jha, S. K. Dash, S. Kumar // ISIJ International. – 2001. – Vol. 41. – № 12. – P. 1437-1446.
7. *Mazumdar D. Guthrie R. I. L.* The Physical and Mathematical Modelling of Continuous Casting Systems // ISIJ International. – 1999. – Vol. 39., №.3. – P. 525-548.
8. *Damle C. A., Sahai Y.* Criterion for water Modeling of Non-isothermal Melt Flows in Continuous Casting Tundishes // ISIJ International. – 1996. – Vol. 36., № 6. – P. 681-689.
9. *Zong J.-H., YIK. -W., Yoon J.-K.* Residence Time Distribution Analysis by the Modified Combined Model for the Design of Continuous Refining Vessel // ISIJ International. – 1999. – Vol. 32. – № 2. – P. 139-148.
10. *Mazumdar D.* Modeling of Steelmaking processes / Bora Raton – London – New-York: CRS Press, 2009. – 463 p.
11. Затвердевание металлического расплава при внешних воздействиях / А. Н. Смирнов, В. Л. Пилюшенко, С. В. Момот и др. // Донецк: Изд-во „ВИК”, 2002. – 169 с.

Поступила 09.10.2014

К сведению читателей

и подписчиков!

Телефон редакции

журнала «Процессы литья»:

(044) 424-04-10