

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добаткин В.И. Непрерывное литье и литейные свойства сплавов - М.: Металлургия, 1975. – 186 с.
2. Бредихин В.Н. Формирования бронзовой заготовки в закрытом горизонтальном кристаллизаторе / В.Н. Бредихин, Н.А. Маняк, Е.Ю. Кушнерова // Металлургические процессы и оборудование – 2008, №4(14) – С.44-48.
3. Бредихин В.Н. Исследование процесса оптимизации качественных характеристик на установках горизонтального непрерывного / В.Н.Бредихин, В.А. Золотухин, Е.Ю. Кушнерова // Сб. трудов XI Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», т.2. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – С.20-24.
4. Бредихин В.Н. Исследование тепловых потоков в горизонтальном кристаллизаторе при литье медных сплавов / В.Н. Бредихин, Е.Ю.Кушнерова // Наукові праці ЗДІА. Металургія. – Запоріжжя: ЗДІА, 2005. - № 11. – С. 12 – 18.
5. Живоглядов В.П. Принципы построения автоматических систем с неполной информацией – М.: «Илим», 1967. - 187 с.
6. Бредихин В.Н. Моделирование тепловых процессов в горизонтальном закрытом кристаллизаторе / В.Н. Бредихин, В.А.Золотухин, Е.Ю. Кушнерова // Сб. трудов XI Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», т.1. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – С.288-294.

Надійшла до редакції 04.10.2011

Рецензент к.т.н., доц. Є.В. Штепан

© Кушнерова Е.Ю., Бредихин В.Н., Маняк Н.А., Шевелев А.И.

УДК 669.14:66.065.5

А.Н. Смирнов, А.В. Кравченко, А.П. Верзилов

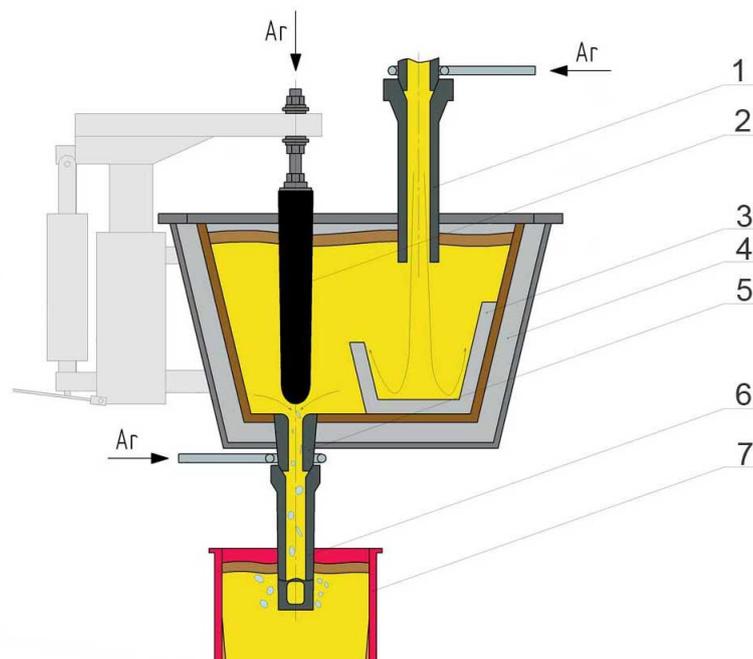
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ДОЗИРОВАНИЯ СТАЛИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ СЛЯБОВОЙ МНЛЗ

Рассмотрены особенности непрерывной разливки стали на слябовой МНЛЗ с применением погружных стаканов различных конструкций. Детально изучены переменные факторы процесса разливки стали с применением погружного стакана и их влияние на процессы истечения металла в кристаллизаторе.

Ключевые слова: разливка, погружной стакан, кристаллизатор, МНЛЗ.

Введение

В последние два десятилетия в науке и промышленности ведутся серьезные исследования, направленные на повышение качества непрерывно-литой заготовки и стабильности процессов затвердевания, протекающих в кристаллизаторе слябовых МНЛЗ (рис. 1) [1].



1 – защитная труба; 2 – стопор; 3 – металлоприемник; 4 – промежуточный ковш; 5 – стакан-дозатор; 6 – погружной стакан; 7 – кристаллизатор.

Рисунок 1 – Схема движения стали из сталеразливочного ковша в кристаллизатор:

С этой целью в большом объеме проводятся разработки, включающие физическое и математическое моделирование, как на промышленных образцах кристаллизаторов, так и на холодных (водных) моделях [2]. Таким образом, начинается период новых прогрессивных методов, которые определяют следующий этап развития высокотехнологических операций в кристаллизаторе.

Цель работы

Основной целью данных исследований, является изучение характерных особенностей развития турбулентных потоков, их возможных траекторий в жидкой ванне кристаллизатора, а также оптимизация основных параметров систем дозирования стали.

Основная часть

В ходе выполненных экспериментов, были созданы комплексные и достаточно надежные физические и математические модели, позволяющие выполнить качественные и количественные прогнозы работы кристаллизатора. На их основе была выдвинута рациональная схема подвода струи в кристаллизатор МНЛЗ, определяющаяся целой совокупностью технологических соображений, впоследствии реализованных на предприятии.

Известно, что струя жидкого расплава, попадающая в кристаллизатор из погружного стакана, имеет большую кинетическую энергию, развива-

ющую мощные циркуляционные потоки перегретой стали. Максимально эффективное нарастание твёрдой корочки, высокая стойкость стакана, а также практически полное всплытие неметаллических включений к зеркалу металла достигается путём подбора конструкции системы дозирования стали: внутренним контуром погружного стакана, размером и формой сечений выпускных отверстий, углом их наклона [1].

При этом важной технологической проблемой является зарастание или размывание внутреннего контура стакана в процессе разливки, что приводит к изменению характера движения струи металла через погружной стакан в кристаллизатор. Вследствие чего, возникает неравномерность распределения потока по сечению кристаллизатора, а также неоднородность течения струи, что негативно влияет на качество поверхности слитка и характер формирования твёрдой корки [3].

Промышленный эксперимент, сопряжён с рядом трудностей (большие затраты на испытания, невозможность визуализации характерных стадий процесса, сложность измерения значений физических величин), в настоящее время для исследований сложных, высокоскоростных технологических операций в многофазных системах, при экстремальных значениях температуры и давления, активно используются методы физического моделирования.

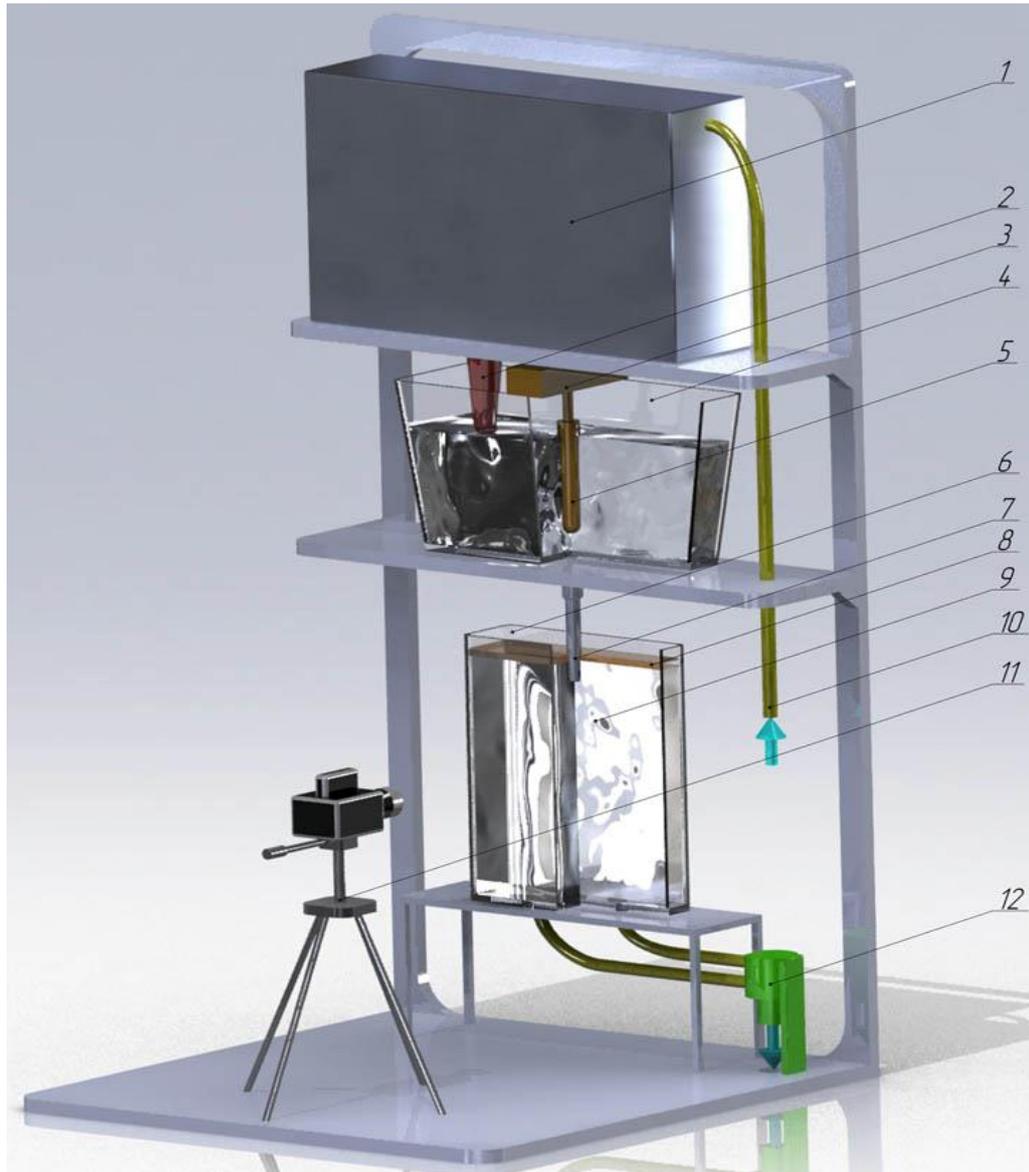
Для решения поставленных задач был выполнен подбор рациональных геометрических критериев физической модели и контроль таких параметров непрерывной разливки, как скорость и расход жидкости, попадающей в кристаллизатор. В качестве рабочей жидкости, моделирующей жидкую сталь, использовалась вода при температуре $18\div 25^{\circ}\text{C}$, так как значения вязкости воды и стали в области температур внепечной обработки и разливки достаточно близки друг к другу (табл. 1) [4].

Таблица 1 – Физические свойства воды при температуре 20°C и стали при температуре 1600°C

Характеристика	Вода	Сталь
Молекулярная вязкость, μ , кг/м·с	0,001	0,0064
Плотность, ρ , кг/м ³	1000	7014
Кинематическая вязкость, $\nu=\mu/\rho$, м ² /с	10^{-6}	$0,913\cdot 10^{-6}$
Поверхностное натяжение, σ , Н/м	0,073	1,6

Имитация покровного шлака на поверхности металла в кристаллизаторе осуществлялась с помощью силиконового или трансформаторного масла, которые имеют высокое поверхностное натяжение и существенно изменяют вязкость при изменении температуры.

Физическая модель кристаллизатора, включая основные функциональные узлы (рис. 2), изготовлена из светопрозрачного материала (оргстекла).

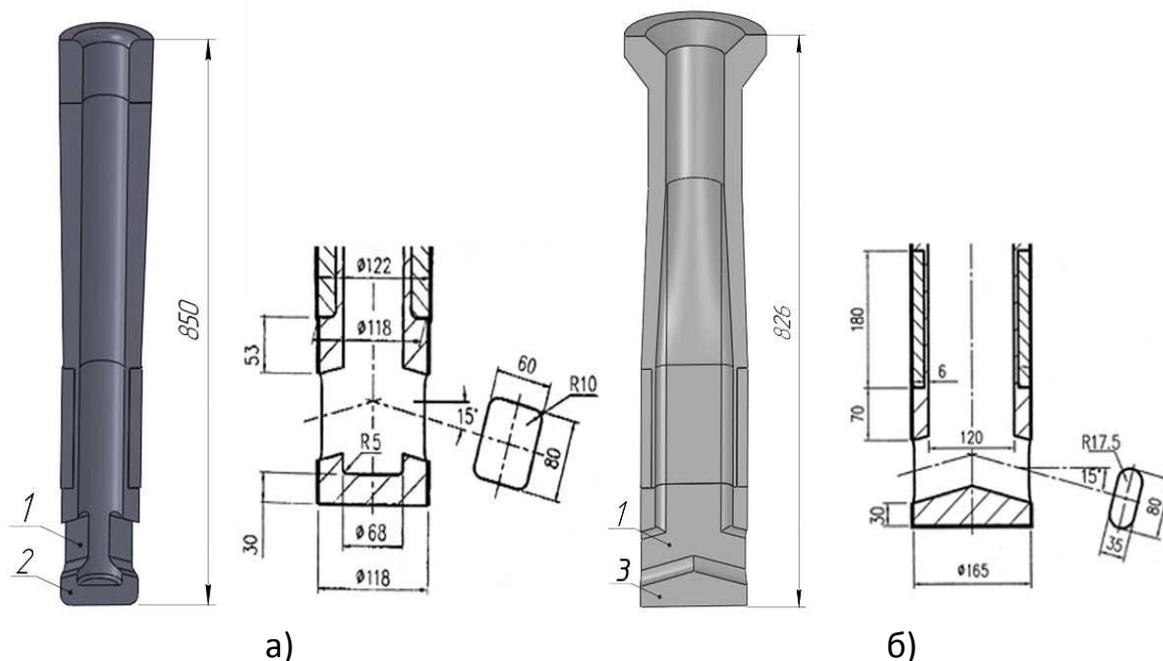


1 – сталеразливочный ковш; 2 – защитная труба; 3 – электродвигатель; 4 – промежуточный ковш; 5 – стопор; 6 – кристаллизатор; 7 – погружной стакан; 8 – силиконовое масло; 9 – рабочая жидкость; 10 – система подачи воды; 11 – видеокамера; 12 – система отвода воды

Рисунок 2 – Схема лабораторной установки для изучения гидродинамики потоков в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ.

Масштаб модели 1:2 оказывается достаточным для визуального наблюдения за всеми гидродинамическими процессами, протекающими в кристаллизаторе практически в режиме реального времени, удовлетворяющими условиям $Fr = \text{item}$ и $We = \text{item}$. Движение потоков фиксировалось с помощью цифровой видеокамеры и подкрашивания локальных объемов вытекающей из сталеразливочного ковша жидкости цветными чернилами.

В основу экспериментальных исследований положено две основные конструкции погружных (сталеразливочных) стаканов: с «ловушкой» и «рассекателем», которые на сегодняшний день являются основными при разливке сляба (рис. 3).



1 – выпускное отверстие, 2 – «ловушка»; 3 – «рассекатель».

Рисунок 3 – Погружные стаканы с ловушкой (а) и рассекателем (б).

В результате выполненных экспериментальных исследований установлено, что при истечении струи жидкости из погружного стакана с «ловушкой» в жидкую ванну, турбулентный поток распределяется по узкой стенке кристаллизатора и делится на два циркуляционных потока, практически равные по интенсивности распределения (рис.4а). В результате чего наблюдается интенсивное перемешивание в зоне погружения стакана, что стимулирует возникновение стоячих волн в зоне мениска.

При этом восходящий турбулентный поток, отразившись от стенки кристаллизатора, продолжает движение непосредственно под зеркалом жидкой фазы и вовлекает в перемешивание жидкую шлакообразующую смесь.

Динамика истечения струи металла из погружного стакана с «рассекателем», в ходе экспериментальных исследований, оказала более стабильное влияние на систему в целом (рис.4б).

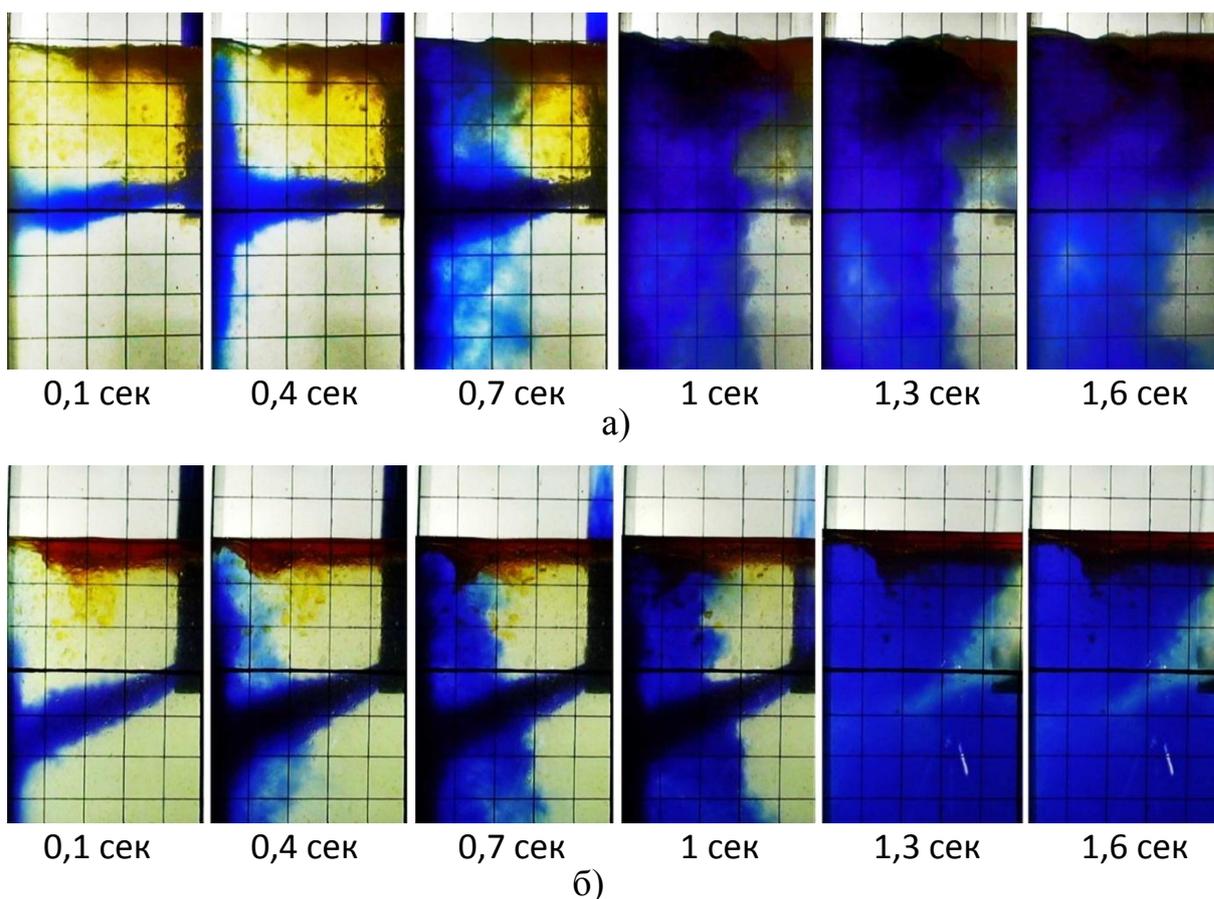


Рисунок 4 – Кинограмма распределения свободной струи при использовании стакана с «ловушкой» (а) и «рассекателем» (б).

На промежутке от выпускного отверстия до узкой стенки кристаллизатора, турбулентный поток носит более направленный целостный характер, что обусловлено конструкцией стакана, т.е. наличием «рассекателя», а также особенностями внутреннего контура.

Рассматривая данный погружной стакан, наблюдается незначительное волнообразование, характеризующееся большой длиной волны, и как следствие значение амплитуды и частоты входит в допустимые пределы, необходимые для получения сляба высокого качества. Что немаловажно, четко сконцентрированный направленный характер струи на выходе из погружного стакана обеспечивает его высокую стойкость при разливке сверхдлинными сериями. В зоне погружения стакана обеспечивается стабильное перемешивание, при этом захват неметаллических включений и ШОС минимальны, что даёт право говорить о более однородной и чистой внутренней структуре слябовой заготовки.

Следующим этапом разработок, после изучения физической стороны явлений происходящих в кристаллизаторе, стали вопросы оптимизации технологических параметров, а также геометрической формы погружного стакана. Решение динамических задач на холодных моделях осложнено необходимостью выполнения чисел подобия и тем, что на многих из них

изменяется, в основном, только один из критериев оценки, что не позволяет изучить совокупное влияние параметров во взаимосвязи. Поэтому дальнейшие исследования целесообразно было выполнять с привлечением методов математического моделирования.

Разработка математической модели выполнена с использованием прикладного пакета ANSYS, реализующего метод конечных элементов (МКЭ), в рамках модуля Flotran, который отражает CFD (Computerized Fluid Dynamics) технологию моделирования [5].

Результатами расчета являлись значения векторов скорости и суммарной скорости, температуры, теплового потока в каждой узловой точке расчетной области для каждого временного шага. Также имеется возможность оценить кинетическую энергию и ее диссипацию, ламинарную и эффективную вязкость расплава, касательные напряжения и турбулентность в пристеночной зоне.

Данные расчетов подтверждают результаты физического моделирования, о чем свидетельствует анализ адекватности его математическому моделированию: струя металла, попадая в кристаллизатор, делится на две части, образуя практически симметричную картину распределения потоков металла (рис. 5).

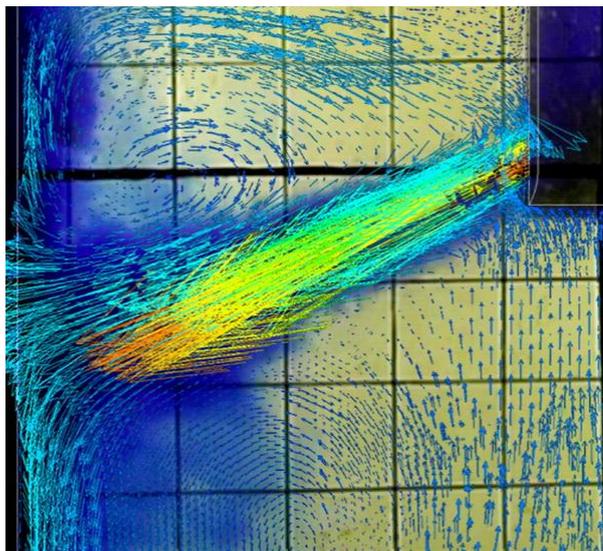
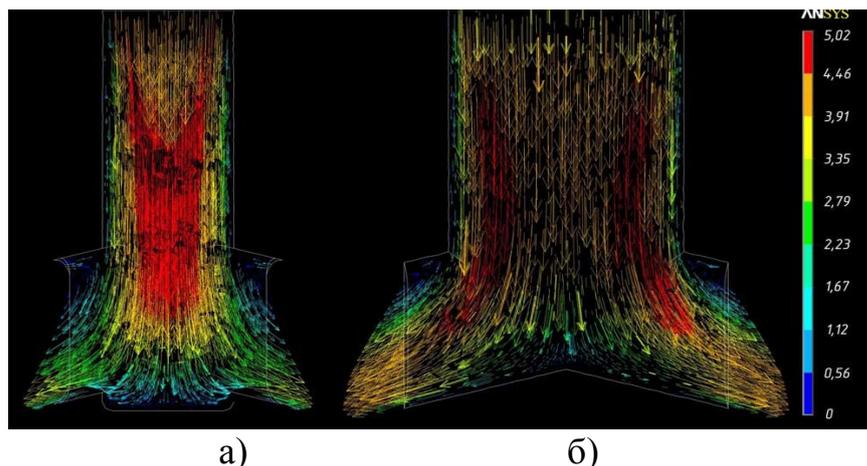


Рисунок 5 – Проверка адекватности математического моделирования

Также с помощью математического моделирования, были выполнены исследования направленные на определение характера движения металла непосредственно в объеме погружного стакана. Стал очевиден тот факт, что в стакане оборудованном «рассекателем» (рис.6б), распределение скоростей потока металла происходит более равномерно, чем в стакане с «ловушкой» (рис.6а).



а) стакан типа «ловушка»; б) стакан типа «рассекатель».

Рисунок 6 – Векторы скоростей в объеме погружных стаканов.

На выходе из выпускного отверстия активная площадь погружного стакана с «ловушкой» достигает не более 55-60%, с «рассекателем» 85-90%. Эти данные наглядно демонстрируют, что в случае использования стакана с «рассекателем», объемы мертвой зоны в выпускном отверстии практически отсутствуют, что значительно снижает вероятность его зарастания и увеличивает показатели его стойкости. При детальном рассмотрении погружного стакана с «ловушкой» можно заметить, что в следствии неравномерности распределения полей скоростей по сечению выпускного отверстия основная нагрузка приходится на его нижнюю часть. Из чего можно сделать вывод, что данный стакан более подвержен эрозии.

На основании результатов математического моделирования, были определены рабочие показатели работы погружных стаканов, за счет чего был разработан ряд рекомендаций для промышленного агрегата.

Промышленный эксперимент был проведен на Алчевском металлургическом комбинате. Испытания были выполнены на установке для непрерывного литья слябов с кристаллизатором вертикального типа. В качестве исходных были приняты параметры: размеры сляба – 250x1250 мм., количество плавков – 5.

Результаты этих исследований полностью подтвердили результаты математического моделирования. Погружной стакан с «рассекателем» показал себя более стабильно, чем с «ловушкой», что наглядно видно из рис.7. При детальном изучении стакана с «рассекателем» был произведен анализ внутреннего сечения и контура выпускных отверстий. Из которого видно, что погружной стакан с «рассекателем» не претерпел каких-либо значительных изменений. Чего нельзя сказать о стакане с «ловушкой», нижние части выпускных отверстий которого были значительно размыты. Таким образом, можно говорить о том, что в процессе разлива данным стаканом постепенно нарушается характер распределения потоков в кристаллизаторе, что сказывается на качестве сляба.

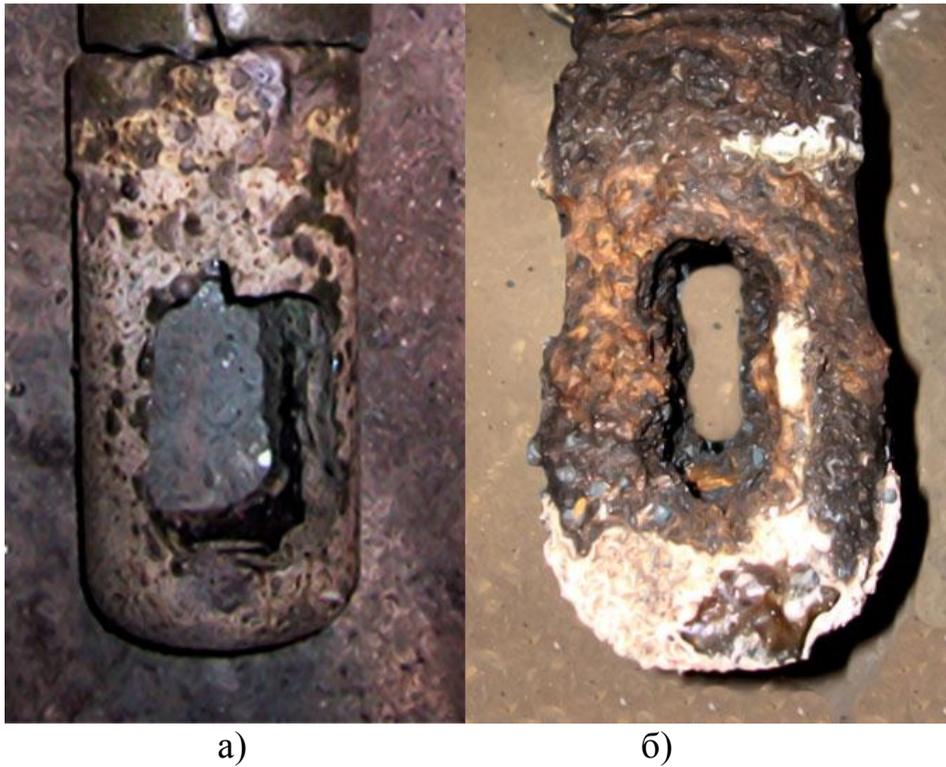


Рисунок 7 – Общий вид стаканов после разливки серии: а) «ловушка»; б) «рассекатель».

При отработке условленного числа плавов на предприятии был выполнен вертикальный разрез погружных стаканов с «рассекателем» (рис.8). Из рисунка видно, что внутренняя полость стакана не подверглась ни за­растанию, ни размыванию. Таким образом, данный стакан в реальных условиях показал себя значительно эффективнее погружного стакана с «ловушкой».



Рисунок 8 – Вертикальный разрез отработанного стакана с «рассека­телем»

Выводы

1. Разработана оригинальная физическая и математическая модель процессов перемешивания и течений жидкости в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ.

2. Выполнен комплекс исследований по оценке эффективности применения различных типов погружных стаканов: с «ловушкой» и «рассекателем».

3. Изучены особенности движения жидкого расплава при истечении его из погружного стакана в кристаллизатор.

4. Рассмотрено влияние различных форм выпускных отверстий на характер истечения металла из погружных стаканов.

5. Проведен промышленный эксперимент оценки работы погружных стаканов на МНЛЗ «Алчевского металлургического комбината».

6. Технологические рекомендации, основанные на данных исследованиях реализованы в конвертерном цехе ОАО «Алчевский металлургический комбинат».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов А.Н. Процессы непрерывной разливки: Монография / А.Н. Смирнов, В.Л. Пилюшенко, А.А. Минаев [и др.] – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
2. Rakeps K.G. Clogging in Continuous Casting Nozzles / K.G. Rakeps, B.G. Thomas // 78th Steelmaking Conf.Proc., Warrendale, PA. – 1995, v.78. - P.723-734.
3. Poirier J. Study of Clogging Phenomena in Continuous Casting Submerged Nozzle / J.Poirier, D.Verrelle, B.Thillou [e.a.] // UNITECR '91 Congress: Unified International Technical Conference on Refractories: Second Biennial Worldwide Conference on Refractories: Global advances in refractories : Aachen, Federal Republic of Germany, September 23-26, 1991 UNITECR'91 Conference Proceedings. – 1991. – P.226-229.
4. Thomas B.G. Flow Dynamics and Inclusion Transport in Continuous Casting of Steel / B.G. Thomas, Q. Yuan, L. Zhang, S.P. Vanka // 2003 NSF Design, Service, and Manufacturing Grantees and Research Conf. Proceedings, R.G. Reddy, ed. University of Alabama, Tuscaloosa, AL 35498. – Birmingham, AL, 2003. – P.2328-2362.
5. Andrzejewski P. Mould Flow Monitoring at No. 3 Slab Caster, Krupp Hoesch Stahl AG / P. Andrzejewski, D. Gotthelf, E. Julius, H. Haubrich, // Steelmaking Conf. Proc., Vol. 80, ISS, Warrendale, PA, 1997. – Chicago, IL, 1997. – P.153-157.

Надійшла до редакції 03.11.2011

Рецензент к.т.н., доц. М.О. Маняк

© Смирнов А.Н., Кравченко А.В., Верзилов А.П.